



Andrzej Rypulak

SENSORY OBRAZOWE BEZZAŁOGOWYCH STATKÓW POWIETRZNYCH

LOTNICZA AKADEMIA WOJSKOWA
DĘBLIN 2023

Lotnicza Akademia Wojskowa

Andrzej Rypulak

Sensory obrazowe bezałogowych statków powietrznych

Redakcja

Emilia Ryczkowska

Marek Szczodrak

Redaktor językowy

Emilia Ryczkowska

Redaktor techniczny/skład i łamanie/projekt graficzny

Katarzyna Bernat-Goluch

Opracowanie rysunków

Andrzej Rypulak

Projekt okładki

Andrzej Rypulak

Wykorzystano zdjęcie EOIR5 Targeting Turret for Integrator, <https://www.insitu.com/products/eoir5>

[dostęp: 20.09.2022].

ISBN 978-83-66514-62-1

© *Copyright by* Wydawnictwo Lotniczej Akademii Wojskowej

Wszelkie prawa zastrzeżone. Kopiowanie, przedrukowanie i rozpowszechnianie całości lub fragmentów niniejszej pracy bez zgody wydawcy zabronione.

Printed in Poland



Druk i oprawa: Wydawnictwo Lotniczej Akademii Wojskowej

Arkuszy wydawniczych: 13,68



SPIS TREŚCI

Wykaz skrótów i akronimów___7

Przedmowa___11

1 Podstawy rozpoznania___15

1.1. Platformy rozpoznania___20

1.2. Sygnatury w rozpoznaniu___25

1.2.1. Pojęcie i rodzaje sygnatur___25

1.2.2. Sygnatury widma elektromagnetycznego___26

1.2.3. Sygnatury inne niż elektromagnetyczne___29

2 Ogólna charakterystyka sensorów___31

2.1. Właściwości sensorów___33

2.1.1. Zakresy pracy sensorów___33

2.1.2. Rozdzielczości sensorów___35

2.1.3. Dokładność sensorów___43

2.2. Kompromisy w zakresie projektowania i wykorzystywania sensorów___44

2.3. Zestawy sensorów___45

3 Sensory BSP – ogólna charakterystyka___47

3.1. Dobór sensorów___47

3.2. Sensory bezzałogowych statków powietrznych wykorzystywane w rozpoznaniu___51

3.3. Rozpoznanie obrazowe IMINT___58

4 Sensory optoelektroniczne___61

4.1. Podstawowe właściwości obrazów cyfrowych___62

4.2. Budowa i działanie kamery elektrooptycznej___65

4.2.1. Obiektyw___66

4.2.2. Migawka___72

4.2.3. Przetworniki obrazu___73

- 4.2.4. Tworzenie obrazu barwnego___84
- 4.2.5. Histogram obrazu___87
- 4.3. Kamery termowizyjne___90
 - 4.3.1. Historia wykorzystania podczerwieni___90
 - 4.3.2. Obrazowanie termiczne___91
 - 4.3.2.1. Podstawowe prawa promieniowania ciepłego___93
 - 4.3.2.2. Promieniowanie obiektów rzeczywistych___98
 - 4.3.2.3. Łańcuch radiometryczny___102
 - 4.3.3. Budowa i działanie kamery termowizyjnej___104
 - 4.3.3.1. Ogólna charakterystyka kamery___104
 - 4.3.3.2. Detektory i systemy detektorów___104
 - 4.3.3.3. Porównanie kamer z detektorami fotonowymi i bolometrycznymi___113
 - 4.3.3.4. Obiektywy kamer termowizyjnych___114
 - 4.3.3.5. Systemy obrazujące___115
 - 4.3.3.6. Stabilizacja temperatury i chłodzenie detektora___117
 - 4.3.3.7. Parametry kamer termowizyjnych___119
- 4.4. Obrazowanie spektralne___126

5 Aktywne sensory obrazowe___129

- 5.1. Obrazowanie radarowe___129
 - 5.1.1. Działanie radaru obrazującego___131
 - 5.1.2. Rozróżnialność odległościowa___133
 - 5.1.3. Rozróżnialność azymutalna___135
 - 5.1.4. Radar z syntetyczną aperturą SAR___137
 - 5.1.5. Właściwości obrazowania radaru SAR___141
 - 5.1.6. Właściwości operacyjne radaru SAR___143
- 5.2. Obrazowanie lidarowe___146
 - 5.2.1. Zasada działania skanowania lidarowego___148

6 Fuzja obrazów z wielu sensorów obrazowych___153

- 6.1. Cele i rodzaje fuzji obrazów___155
- 6.2. Ograniczenia fuzji obrazów___158

7 Kryteria oceny jakości sensorów obrazowych___159

- 7.1. Ocena jakości systemów optycznych___160
 - 7.1.1. Odpowiedź impulsowa___160
 - 7.1.2. Częstość przestrzenna___163
 - 7.1.3. Funkcja przenoszenia___166
 - 7.1.3.1. Funkcja przenoszenia modulacji MTF___168
 - 7.1.3.2. Funkcja przenoszenia fazy PTF___170
 - 7.1.4. MTF i rozdzielczość___172
 - 7.1.5. MTF dyfrakcji___175

- 7.1.6. Wpływ aberracji na MTF ___177
- 7.1.6.1. Wpływ rozogniskowania na MTF ___179
- 7.1.6.2. Wpływ innych aberracji na MTF ___181
- 7.1.6.3. Wizualizacja innych zależności MTF ___183
- 7.2. MTF sensorów elektrooptycznych ___184
- 7.2.1. MTF pola widzenia detektora IFOV ___185
- 7.2.2. Próbkowanie ___187
- 7.2.2.1. Aliasing ___187
- 7.2.2.2. MTF próbkowania ___190
- 7.2.3. MTF układów elektronicznych ___195

8 Praktyczne pomiary funkcji przenoszenia modulacji MTF ___199

- 8.1. Test w postaci fali prostokątnej ___199
- 8.2. Testy paskowe ___202
- 8.3. Przegląd metod określania rozdzielczości przestrzennej sensorów obrazowych ___204
- 8.4. Doświadczalne badanie parametrów jakości sensorów obrazowych ___210

9 Czynniki wpływające na jakość obrazów związane z atmosferą, zjawiskami meteorologicznymi i obserwowanym obiektem ___215

- 9.1. Źródła i zasady promieniowania ___216
- 9.2. Rozchodzenie się promieniowania elektromagnetycznego w atmosferze ___218
- 9.2.1. Widzialność a zasięg meteorologiczny ___223
- 9.2.2. Okna atmosferyczne ___224
- 9.3. Wpływ warunków meteorologicznych na propagację promieniowania elektromagnetycznego ___225
- 9.3.1. Propagacja promieniowania podczerwonego przez atmosferę ___226
- 9.3.2. Porównanie właściwości promieniowania podczerwonego w zakresach częstotliwości MWIR i LWIR ___229
- 9.3.3. Odbicia słoneczne ___231
- 9.3.4. Ogrzewanie słoneczne ___232
- 9.3.5. Wpływ różnych czynników na zobrazowanie termowizyjne ___235
- 9.4. Absorpcja fal elektromagnetycznych o długościach milimetrowych przez deszcz i mgłę ___237
- 9.5. Zanieczyszczenia pola bitwy ___238
- 9.6. Wpływ zakłóceń atmosferycznych na działanie sensorów obrazowych ___240
- 9.7. Modele atmosfery i systemy wspomaganie oceny stanu atmosfery ___243
- 9.7.1. Modele atmosfery LOWTRAN i MODTRAN ___244
- 9.7.2. Model właściwości sensorów EOSAEL ___246
- 9.7.3. System planowania misji TAWS ___248

10 Kryteria detekcji, rozpoznania, identyfikacji i lokalizacji obiektów____253

10.1. Ilościowe metody określania zasięgów DRI____257

10.1.1. Kryterium Johnsona____257

10.1.2. Model TTP wyznaczania parametrów zasięgowych urządzeń obserwacyjnych____264

10.2. Jakościowe metody oceny właściwości interpretacyjnych obrazów____266

11 Wielosensorowe systemy obserwacyjne BSP____273

11.1. Głowice obserwacyjne____277

11.1.1. Proces poszukiwania____281

11.1.2. Stabilizacja linii widzenia____284

11.1.3. Funkcje głowicy obserwacyjnej____286

11.1.4. Zobrazowania uzyskiwane z sensorów głowicy obserwacyjnej____289

11.2. Radary SAR____292

11.3. Porównanie sensorów optoelektronicznych i radaru SAR____293

11.4. Wykorzystanie operacyjne wielosensorowego systemu obserwacyjnego BSP____294

Literatura____297



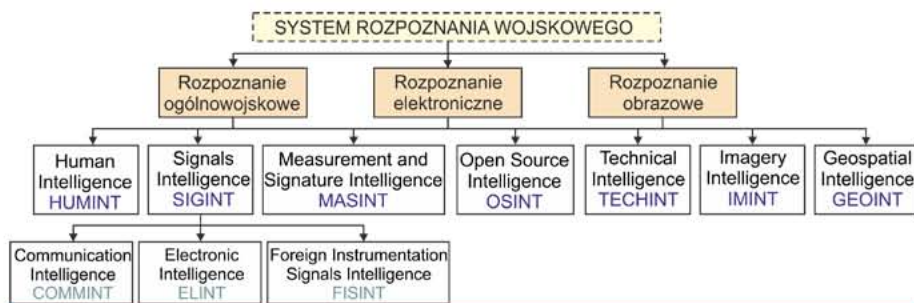
WYKAZ SKRÓTÓW I AKRONIMÓW

| | | |
|--------|---|--|
| ATR | <i>Automatic Target Recognition</i> | automatyczne rozpoznanie celu |
| BSP | – | bezzałogowy statek powietrzny |
| C3IS | <i>Command, Control, Communication and Information Systems</i> | dowodzenie, kierowanie, łączność i systemy informatyczne |
| CBRNE | <i>Chemical, Biological, Radiological, Nuclear and Explosives</i> | wykrywania i monitorowania zagrożeń chemicznych, biologicznych, radiologicznych, nuklearnych i wybuchowych |
| CCD | <i>Charge Coupled Device</i> | matryca CCD |
| CMOS | <i>Complementary Metal Oxide Semiconductor</i> | matryca CMOS |
| COMINT | <i>Communication Intelligence</i> | rozpoznanie radiowe |
| CSAR | <i>Combat Search And Rescue</i> | bojowe poszukiwanie i ratownictwo |
| CTF | <i>Contrast Transfer Function</i> | funkcja przenoszenia kontrastu |
| DOF | <i>Depth of Field</i> | głębina ostrości |
| dpi | <i>dot per inch</i> | piksel na cal |
| DRI | <i>Detection, Recognition, Identification</i> | detekcja, rozpoznanie, identyfikacja |
| ELINT | <i>Electronic Intelligence</i> | rozpoznanie sygnałów elektronicznych |
| EO | <i>Electro-Optical</i> | elektrooptyczny |
| EOSAEL | <i>The Electro-Optical Systems Atmospheric Effects Library</i> | Biblioteka Efektów Atmosferycznych Systemów ElektroOptycznych |
| FISINT | <i>Foreign Instrumentation Signals Intelligence</i> | rozpoznanie sygnałów obcych urządzeń |
| FOR | <i>Field of Regard</i> | pole obserwacji |
| FOV | <i>Field of View</i> | pole widzenia |
| FPA | <i>Focal Plane Array</i> | matryca detektorów |
| fps | <i>frame per second</i> | klatka na sekundę |
| GCS | <i>Ground Control Station</i> | naziemna stacja kontroli i sterowania |
| GEOINT | <i>Geospatial Intelligence</i> | rozpoznanie geoprzestrzenne |
| GIQE | <i>General Image Quality Equation</i> | model GIQE |
| GMTI | <i>Ground Moving Target Indication</i> | wskazywanie naziemnych obiektów ruchomych |
| GPS | <i>Global Positioning System</i> | system nawigacji satelitarnej |

| | | |
|---------|--|--|
| GRD | <i>Ground Resolved Distance</i> | terenowa zdolność rozdzielcza |
| GSD | <i>Ground Sample Distance</i> | terenowy wymiar piksela |
| HALE | <i>High Altitude Long Endurance</i> | BSP klasy HALE |
| HUMINT | <i>Human Intelligence</i> | rozpoznanie osobowe |
| IFF | <i>Identification Friend or Foe</i> | rozpoznanie swój-obcy |
| IFOV | <i>Instantaneous Field of View</i> | chwilowe pole widzenia |
| IMINT | <i>Imagery Intelligence</i> | rozpoznanie obrazowe |
| IMU | <i>Inertial Measurement Unit</i> | inercyjny system odniesienia |
| INS | <i>Inertial Navigation System</i> | system nawigacji inercjalnej |
| IR | <i>Infrared</i> | podczerwień |
| ISAR | <i>Inverse Synthetic Aperture Radar</i> | radar z odwróconą syntetyczną aperturą |
| ISR | <i>Intelligence, Surveillance, Reconnaissance</i> | rozpoznanie, obserwacja, rozpoznanie pola walki |
| LDR | <i>Laser Designator Rangefinder</i> | laserowy wskaźnik celu i odległościomierz |
| LI | <i>Laser Illuminator</i> | laserowy oświetlacz |
| Lidar | <i>Light Detection and Ranging</i> | – |
| LOS | <i>Line of Sight</i> | linia widzenia |
| LOWTRAN | <i>LOW resolution atmospheric TRANsmision</i> | model o niskiej rozdzielczości transferu radiacyjnego atmosfery |
| LR | <i>Laser Rangefinder</i> | laserowy odległościomierz |
| LSI | <i>Linear Shift-Invariant</i> | liniowy system niezmienny względem przesunięcia |
| LWIR | <i>Long Wave Infra Red</i> | długofalowy zakres podczerwieni |
| LW/PH | <i>Line Widths per Picture Height</i> | liczba linii na wysokość ekranu |
| LTD | <i>Laser Target Designator</i> | laserowy wskaźnik celu |
| LTM | <i>Laser Target Marker</i> | laserowy wskaźnik celu |
| MALE | <i>Medium Altitude Long Endurance</i> | BSP klasy MALE |
| MASINT | <i>Measurement and Signiture Intelligence</i> | rozpoznanie pomiarowo-badawcze |
| MDTD | <i>Minimum Detectable Temperature Difference</i> | minimalna wykrywalna różnica temperatur |
| MEMS | <i>Micro Electro Mechanical System</i> | mikrosystem elektromechaniczny |
| METOC | <i>Meteorology and Oceanography</i> | meteorologia i oceanografia |
| MFOV | <i>Medium Field of View</i> | normalne pole widzenia |
| MMTI | <i>Maritime Moving Target Indication</i> | wskazywanie morskich obiektów ruchomych |
| MODTRAN | <i>MODerate resolution atmospheric TRANsmision</i> | model o średniej rozdzielczości transferu radiacyjnego atmosfery |
| MRC | <i>Minimum Resolvable Contrast</i> | minimalny rozróżnialny kontrast |

| | | |
|---------|--|---|
| MRTD | <i>Minimum Resolvable Temperature Difference</i> | minimalna rozróżnialna różnica temperatur |
| MTF | <i>Modulation Transfer Function</i> | funkcja przenoszenia modulacji |
| MTOW | <i>Maximum Take Off Weight</i> | maksymalna masa startowa |
| MTI | <i>Moving Target Indication</i> | wskazywanie obiektów ruchomych |
| MWIR | <i>Medium Wave Infra Red</i> | średniofalowy zakres podczerwieni |
| NEM | <i>Noise Equivalent Modulation</i> | modulacja równoważna szumom |
| NEP | <i>Noise Equivalent Power</i> | moc równoważna szumom |
| NETD | <i>Noise Equivalent Temperature Difference</i> | różnica temperatury równoważna szumom (rozdzielczość temperaturowa) |
| NIIRS | <i>National Imagery Interpretability Rating Scale</i> | skala możliwości interpretacji zobrazowań |
| NIR | <i>Near Infra Red</i> | bliska podczerwień |
| OSINT | <i>Open Source Intelligence</i> | rozpoznanie z dostępnych źródeł |
| OTF | <i>Optical Transfer Function</i> | optyczna funkcja przenoszenia |
| PSD | <i>Power Spectral Density</i> | gęstość widmowa mocy |
| PSF | <i>Point Spread Function</i> | funkcja rozmycia punktu |
| PSYOP | <i>Psychological Operations</i> | operacje psychologiczne |
| PTF | <i>Phase Transfer Function</i> | funkcja przenoszenia fazy |
| ROIC | <i>Read Out Integrated Circuit</i> | układ odczytu ROIC |
| RSTA | <i>Reconnaissance, Surveillance and Target Acquisition</i> | rozpoznanie pola walki, obserwacja, wskazywanie obiektów uderzeń |
| RTK GPS | <i>Real Time Kinematic GPS</i> | – |
| SAR | <i>Synthetic Aperture Radar</i> | radar z syntetyczną aperturą |
| SIGINT | <i>Signals Intelligence</i> | rozpoznanie elektroniczne |
| SLAR | <i>Side Looking Airborne Radar</i> | radar obserwacji bocznej |
| SNR | <i>Signal to Noise Ratio</i> | stosunek sygnału do szumu |
| SP | – | statek powietrzny |
| SRF | <i>Slit Response Function</i> | funkcja odpowiedzi szczeliny |
| SWIR | <i>Short Wave Infra Red</i> | krótkofalowy zakres podczerwieni |
| TAWS | <i>Target Acquisition Weapons Software</i> | system planowania misji |
| TCR | <i>Temperature Coefficient of Resistance</i> | temperaturowy współczynnik zmian rezystancji |
| TECHINT | <i>Technical Intelligence</i> | rozpoznanie techniczne |
| TTP | <i>Targeting Task Performance Metric</i> | model TTP |
| VLWIR | <i>Very Long Wave Infra Red</i> | ultradługofalowy zakres podczerwieni |
| WFE | <i>Wavefront Error</i> | błąd frontu falowego |

Dostarczenie niezbędnych do rozpoczęcia i prowadzenia działań informacji zapewnia system rozpoznania. W zależności od rodzaju aktywności rozpoznanie dzieli się na cztery fazy: gromadzenie danych, analizę danych, podjęcie ukrytych działań, działania kontrwywiadowcze. Wyróżnia się siedem podstawowych źródeł gromadzenia danych – metod rozpoznania (rys. 1.1) [30, 11].



■ Rys. 1.1. System rozpoznania wojskowego [opr. wł.]

1. **ROZPOZNANIE OSOBOWE** (ang. *Human Intelligence* – HUMINT) polega na pozyskiwaniu informacji zdobytych, zgromadzonych i dostarczonych przez źródła osobowe. Każda osoba zarówno z wojsk własnych, jak i z wojsk strony neutralnej lub przeciwnej może być źródłem informacji.
2. **ROZPOZNANIE ELEKTRONICZNE** (ang. *Signals Intelligence* – SIGINT) polega na pozyskiwaniu informacji rozpoznawczych na podstawie danych pochodzących ze spektrum elektromagnetycznego. Rozpoznanie elektroniczne dzieli się na:
 - **ROZPOZNANIE RADIOWE** (ang. *Communication Intelligence* – COMINT), które uzyskuje informacje z radiowych transmisji systemów łączności przechwyconych przez innych odbiorców niż tych, do których transmisja jest adresowana;
 - **ROZPOZNANIE SYGNAŁÓW ELEKTRONICZNYCH** (ang. *Electronic Intelligence* – ELINT) to rodzaj rozpoznania, które zdobywa informacje z sygnałów widma promieniowania elektromagnetycznego niebędących sygnałami łączności;

- **ROZPOZNANIE SYGNAŁÓW OBCYCH URZĄDZEŃ** (ang. *Foreign Instrumentation Signals Intelligence* – FISINT) – informacje techniczne i rozpoznawcze pochodzące z przechwycenia obcych emisji elektromagnetycznych związanych z testowaniem i rozmieszczeniem systemów lotniczych, naziemnych i podpowierzchniowych. Sygnały FISINT nie dotyczą języka ludzkiego, lecz języków komunikowania się urządzeń lub też są kombinacją języka ludzkiego i urządzeń. Przykładami takiej komunikacji są:
 - **DANE TELEMTRYCZNE.** Pociski, satelity i inne zdalnie monitorowane urządzenia przesyłają strumienie danych dotyczących ich lokalizacji, prędkości, parametrów silnika i innych wskaźników,
 - **ŁĄCZA DANYCH WIDEO.** Mogą to być sygnały wideo z rozpoznawczych bezzałogowych statków powietrznych lub satelitów,
 - **SYGNAŁY ZDALNEGO DOSTĘPU** – na przykład ze zdalnych systemów otwierania obiektów, bezprzewodowych dzwonek do drzwi itp.,
 - **SYGNAŁY ZDALNEGO STEROWANIA,** takie jak sterowanie pojazdami latającymi, pociskami raketowymi i zdalnie sterowanymi robotami.
- 3. **ROZPOZNANIE OBRAZOWE** (ang. *Imagery Intelligence* – IMINT). Prowadzone jest w oparciu o obrazy pozyskane przez sensory: fotograficzne, elektrooptyczne, laserowe, termalne, radarowe, wielospektralne i hyperspektralne, które mogą być umieszczone na platformach powietrznych, kosmicznych, wodnych i lądowych. Głównym zadaniem IMINT jest gromadzenie obrazów oraz ich badanie lub interpretacja w celu identyfikacji obiektów i oceny ich znaczenia. W kategoriach wojskowych rozpoznanie obrazowe wykorzystywane jest do rozpoznania:
 - potencjału gospodarczego i militarnego ewentualnego przeciwnika:
 - zdolności przemysłowych, w tym zdolności produkcyjnych sprzętu wojskowego,
 - rozwoju nowych technologii,
 - możliwości rozwoju broni masowego rażenia,
 - stanu i rodzaju wyposażenia wojskowego,
 - głównych tras dostaw lub działalności w miejscach przechowywania broni,
 - przeprowadzanych ćwiczeń wojskowych,
 - ruchów wojsk;
 - oznak rozwoju konfliktu zbrojnego:
 - rozmieszczenie jednostek wojskowych,
 - przebiegu mobilizacji,
 - stopnia intensywności ćwiczeń,
 - aktywności w miejscach składowania broni i amunicji;

- rozpoznania podczas konfliktu zbrojnego:
 - rozmieszczenie jednostek wojskowych,
 - ocena strategii działania przeciwnika,
 - *targeting* (lokalizacja celów),
 - planowanie misji i ocena wyników walki.

Analiza obrazu znajduje również wiele zastosowań cywilnych, między innymi w weryfikacji traktatów i umów międzynarodowych lub kontroli rozprzestrzeniania broni [41].

Rezultat procesu analizy obrazu może być obrazem, specjalistycznym raportem lub tylko informacją o istnieniu obiektu. Zależy to od potrzeb użytkownika końcowego, a także od czynników, takich jak jakość obrazu, dostępność czasu na wykonanie zadania lub innych ograniczeń.

4. **ROZPOZNANIE POMIAROWO-BADAWCZE** – określane często również sygnałowym i pomiarowym (ang. *Measurement and Signature Intelligence* – MASINT). Jest to rozpoznanie, które w procesie zebrania, obróbki i analizy danych generuje informacje umożliwiające namierzenie, śledzenie, identyfikację, a także opis sygnatur (rozdz. 1.3.1) obiektów. Sensory systemu rozpoznania obejmują badania spektrów: radarowego, optycznego, podczerwonego, akustycznego i nuklearnego, detekcji radiacji, spektrometrii, systemów sejsmicznych, jak również składu cząsteczkowego gazów, cieczy i materiałów stałych. Wykorzystywane jest do wykrywania pocisków rakietowych taktycznych i strategicznych, statków powietrznych, działań nuklearnych i chemicznych, rozpoznawania celów, wykrywania materiałów wybuchowych, oceny pola bitwy.

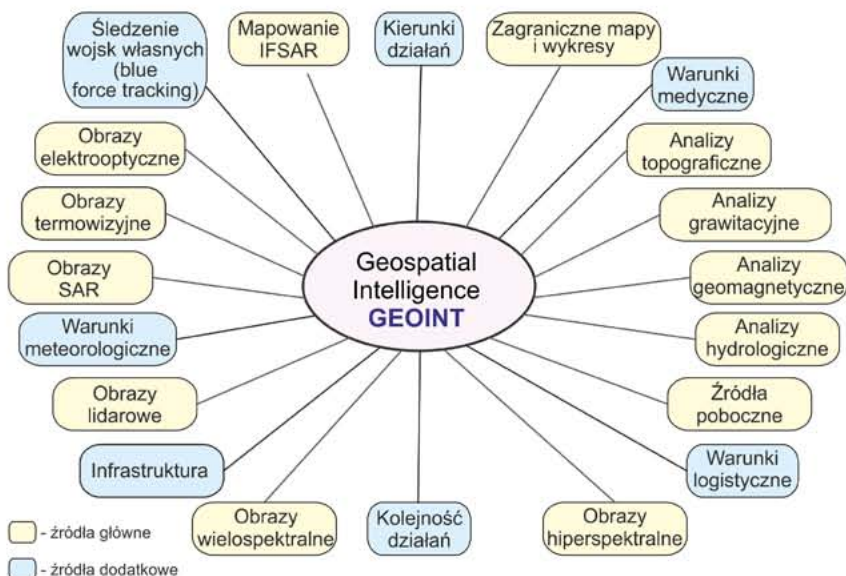
W jego skład wchodzi rozpoznanie:

- *Radar Intelligence* (RADINT) – radiolokacyjne;
- *Acoustic Intelligence* (ACOUSTINT) – akustyczne;
- *Nuclear Intelligence* (NUCINT) – nuklearne;
- *Radio Frequency/Electromagnetic Pulse Intelligence* (RF/EMPINT) – impulsu elektromagnetycznego;
- *Electro-optical Intelligence* (ELECTRO-OPTINT) – elektrooptyczne;
- *Laser Intelligence* (LASINT) – laserowe;
- *Infrared Intelligence* (IRINT) – podczerwieni, radiacyjne;
- *Unintentional Radiation Intelligence* (RINT) – radiacyjne (pośrednie);
- *Chemical and Biological Intelligence* (CBINT) – chemiczne i biologiczne;
- *Directed Energy Weapons Intelligence* (DEWINT) – broni wykorzystującej energię ukierunkowaną;
- *Effluent/Debris Collection* – ścieki/odpady;
- *Materials Intelligence* – rozpoznanie materiałowe;
- *Spectroscopic Intelligence* – rozpoznanie spektroskopowe.

5. **ROZPOZNANIE Z DOSTĘPNYCH (OTWARTYCH) ŹRÓDEŁ** (ang. *Open Source Intelligence* – OSINT) polega na gromadzeniu informacji ze źródeł dostępnych opinii publicznej, takich jak prasa, radio, telewizja, Internet.
6. **ROZPOZNANIE TECHNICZNE** (ang. *Technical Intelligence* – TECHINT) – dane rozpoznania pochodzą z gromadzenia, przetwarzania, analizy i wykorzystania informacji dotyczących sprzętu i materiałów w celu uniknięcia zaskoczenia przez techniczne i technologiczne możliwości ewentualnego przeciwnika, oceny jego zdolności naukowych i technicznych oraz opracowania środków zaradczych w celu zmniejszenia jego przewag w tych obszarach.
7. **ROZPOZNANIE GEOPRZESTRZENNE** (ang. *Geospatial Intelligence* – GEOINT) obejmuje pozyskanie i analizę obrazów oraz informacji geoprzestrzennych dla opisanego, oceny i wizualnego przedstawienia cech fizycznych (zarówno naturalnych, jak również stworzonych przez człowieka) oraz aktywności na powierzchni ziemi w powiązaniu do danych geograficznych (rys. 1.2).

Rozpoznanie GEOINT odpowiada na następujące pytania:

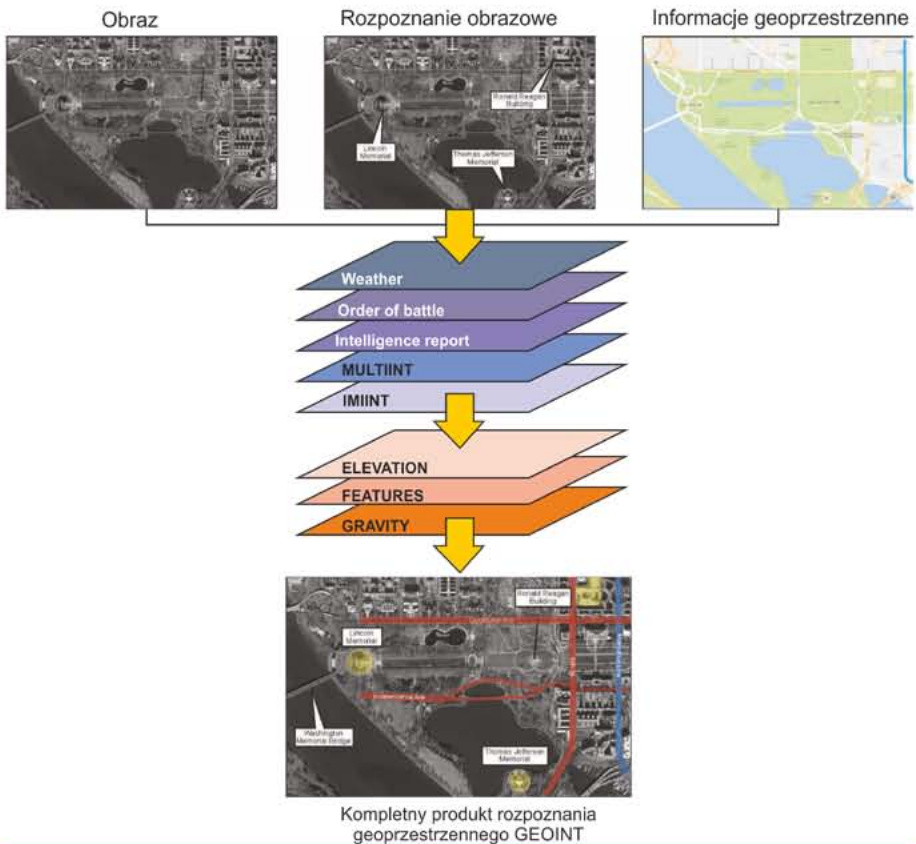
- Gdzie ja jestem?
- Gdzie są moi sprzymierzeńcy?
- Gdzie jest przeciwnik?
- Kiedy i w jaki sposób może się przemieszczać?
- Gdzie jest ludność cywilna?
- Gdzie są przeszkody naturalne i stworzone przez człowieka oraz w jaki sposób poruszać się pomiędzy nimi?
- Jakie jest otoczenie i jaki jest jego wpływ na moje działania?



■ Rys. 1.2. Źródła rozpoznania geoprzestrzennego GEOINT [opr. wł. na podst. 20]

Rozpoznanie geoprzestrzenne obejmuje (rys. 1.3):

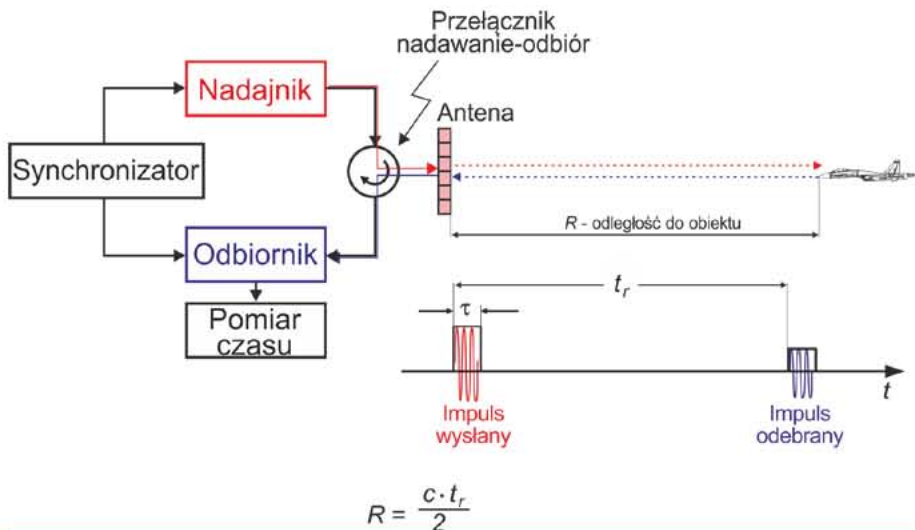
- **OBRAZY** – obejmują reprezentację wszystkich naturalnych lub stworzonych przez człowieka obiektów fizycznych oraz aktywności na powierzchni ziemi wraz z ich danymi pozycyjnymi pozyskanymi w tym samym czasie. Źródłami danych są satelity komercyjne i rządowe, statki powietrzne (załogowe lub bezzałogowe), a także inne platformy. Obrazy wykorzystywane przez GEOINT nie obejmują fotografii wykonanych ręcznie ani z ukrycia przez organizacje zbierające dane wywiadowcze;
- **ROZPOZNIANIE OBRAZOWE** – informacje techniczne, geograficzne i rozpoznawcze uzyskane na podstawie interpretacji lub analizy zdjęć i materiałów dodatkowych;
- **INFORMACJE GEOPRZESTRZENNE** – informacje, które identyfikują położenie geograficzne i cechy naturalne lub wytworzone przez człowieka obejmujące: dane statystyczne, informacje uzyskane z teledetekcji, mapowania i pomiarów, danych geodezyjnych i powiązanych produktów.



■ Rys. 1.3. Elementy składowe systemu rozpoznania GEOINT [opr. wł. na podst. 20]

5.1. OBRAZOWANIE RADAROWE

Określenie **RADAR** powstało jako skrót od słów *Radio Detection And Ranging*. Jak sama nazwa wskazuje, radar pierwotnie służył do wykrywania obiektów i określania do nich odległości. Z czasem radary umożliwiały również określanie położenia kąтового wykrytych obiektów oraz ich prędkości. Proces wykrywania polega na wysyłaniu krótkich impulsów energii mikrofalowej w interesującym kierunku oraz rejestrowaniu sygnału odbitego (echa) od obiektów znajdujących się w polu widzenia radaru (rys. 5.1).



■ Rys. 5.1. Idea określania odległości do wykrytego obiektu z wykorzystaniem radaru impulsowego [opr. wł.]

Odległość do wykrytego obiektu określa się, korzystając z wzoru:

$$R = \frac{c \cdot t_R}{2} \quad (5.1)$$

gdzie:

R – odległość do wykrywanego obiektu;

c – prędkość propagacji fal elektromagnetycznych, która jest w przybliżeniu równa prędkości światła (w praktyce przyjmuje się $c = 300\,000$ km/s);

t_R – czas niezbędny do pokonania podwójnej odległości do obiektu, najkrótszą drogą od anteny nadawczej do obiektu i z powrotem do anteny odbiorczej.

Radar obrazujący, tzw. **RADAR OBSERWACJI BOCZNEJ SLAR** (ang. *Side Looking Airborne Radar*), pracujący w paśmie mikrofalowym, został opracowany do celów rozpoznania wojskowego pod koniec lat 40. Działa na podobnej zasadzie jak typowe urządzenia radiolokacyjne służące do wykrywania obiektów. Obrazowanie radiolokacyjne posiada właściwości, znacznie rozszerzające możliwości rozpoznania, które do tej pory prowadzone było tylko w optycznej części widma. Cechy te okazały się również bardzo atrakcyjne z punktu widzenia zastosowań cywilnych, gdyż:

- nie wymaga oświetlenia, ponieważ radar jest urządzeniem aktywnym i sam „oświetla” teren wiązką mikrofal;
- jest niezależne od warunków atmosferycznych, gdyż mikrofałe są w stanie przeniknąć przez atmosferę praktycznie w każdych warunkach. W zależności od długości fali, energia mikrofalowa może „widzieć” przez zamglenie, lekki deszcz i śnieg, chmury i dym;
- dają inny obraz środowiska i obiektów na powierzchni ziemi niż ten, który uzyskiwany jest za pomocą sensorów pasywnych. Wynika to z faktu, że odbicia mikrofalowe nie mają bezpośredniego związku z ich odpowiednikami w widzialnej lub termicznej części widma.

Wadą radarów SLAR jest uzyskiwana za ich pomocą niska zdolność rozdzielcza obrazu (rzędu kilkadziesiąt metrów), ograniczona przede wszystkim rozmiarami anteny.

Mikrofalowa część widma obejmuje długości fal w zakresie od 1 mm do 1 m. Tak więc najdłuższe mikrofałe są około 2 500 000 razy dłuższe niż najkrótsze fale świetlne. Zakres promieniowania mikrofalowego został podzielony na pasma oznaczone kodem literowym (tabela 5.1).

■ Tabela 5.1. Pasma promieniowania mikrofalowego [opr. wł.]

| Zakres | Długość fali λ [cm] | Częstotliwość f [GHz] |
|--------|-----------------------------|-------------------------|
| Ka | 0,8÷1,1 | 40÷26,5 |
| K | 1,1÷1,7 | 26,5÷18 |
| Ku | 1,7÷2,4 | 18÷12,5 |
| X | 2,4÷3,8 | 12,5÷8 |
| C | 3,8÷7,5 | 8÷4 |
| S | 7,5÷15 | 4÷2 |
| L | 15÷30 | 2÷1 |
| P | 30÷100 | 0,3÷1 |

Długość fali ma zasadnicze znaczenie dla zastosowań obrazowania wykonanego z jej wykorzystaniem. Na echo sygnałów mikrofalowych wpływają przede wszystkim te obiekty, których wielkość jest porównywalna z długością fali.

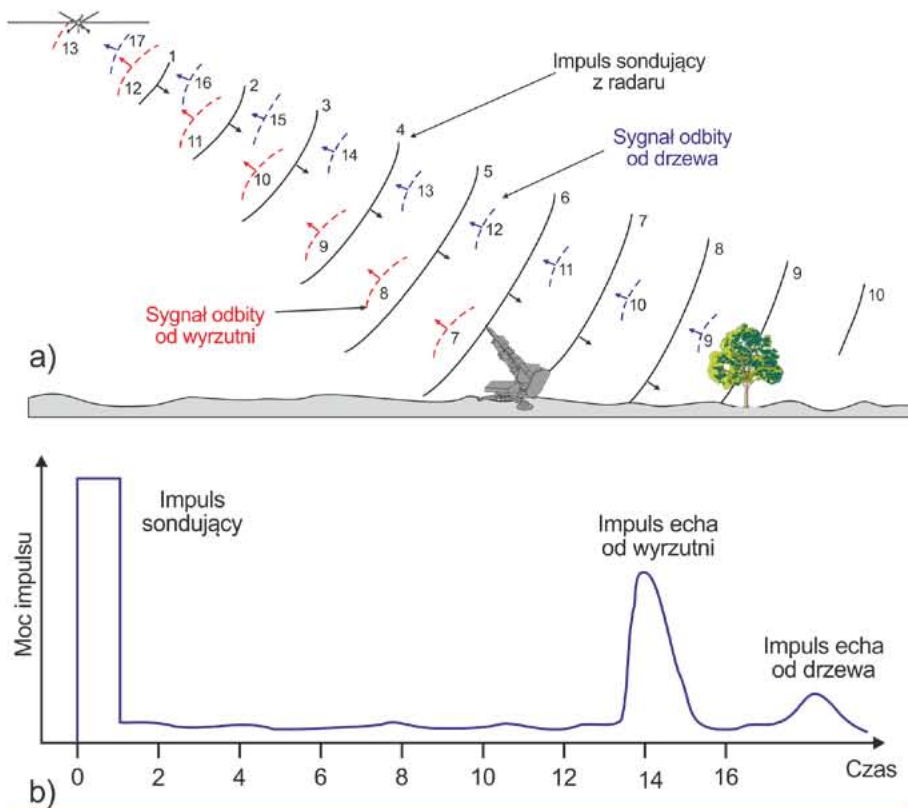
Radary obrazowania wykorzystują antenę zamocowaną pod statkiem powietrznym i skierowaną w bok, stąd ich nazwa – radary obserwacji bocznej SLAR. Nowoczesne radary obrazujące wykorzystują zaawansowane metody formowania wiązek antenowych i są określane jako radary z syntetyczną aperturą (SAR). Obydwie odmiany radarów tworzą obrazy terenu w postaci ciągłych pasów, które są równoległe do trajektorii lotu platformy.

5.1.1. DZIAŁANIE RADARU OBRAZUJĄCEGO

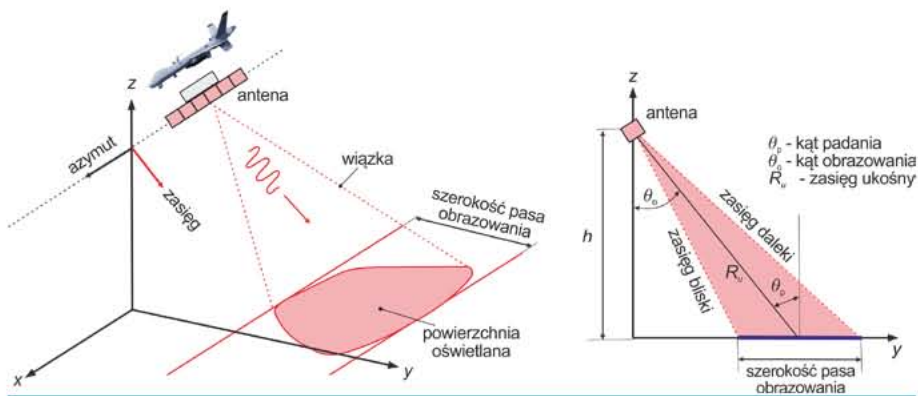
Zasada działania radaru obrazującego została przedstawiona na rys. 5.3. Poprzez swoją antenę radar wysyła w bok impulsy fal elektromagnetycznych o bardzo krótkim czasie trwania τ (rzędu μs) i dużej mocy. Energia pojedynczego impulsu skoncentrowana jest w płaski wachlarz nazywany śladem: ma on dużą rozwartość w kierunku poprzecznym do kierunku lotu (tzw. kierunek zasięgu) i małą rozwartość w kierunku lotu (tzw. kierunek azymutalny) (rys. 5.3). Impuls energii dociera do obiektów na powierzchni ziemi, które w różnym stopniu go rozpraszają. Część energii ulega wytlumieniu, część rozproszeniu, a pozostała, bardzo niewielka, zostaje odbita w kierunku anteny.

Na rys. 5.2 propagacja jednego impulsu jest pokazana poprzez wskazanie lokalizacji czoła fali w kolejnych momentach czasu. Począwszy od linii ciągłych (oznaczonych od 1 do 10) nadawany impuls porusza się promieniście w kierunku od samolotu w postaci ograniczonej (lub wąskiej) wiązki. Krótco po momencie czasowym 6 impuls dociera do budynku, a fala odbita (linia przerywana) jest pokazana począwszy od momentu 7. W momencie 12 ten sygnał powrotny dociera do anteny i jest rejestrowany (rys. 5.2.b). W momencie 9 czoło nadawanej fali odbija się od drzewa, a jej echo dociera do anteny w momencie 17. Ponieważ drzewo w mniejszym stopniu odbija fale radarowe niż budynek, antena odbiera sygnał echa o mniejszej energii niż w przypadku odbicia od budynku. Podobnie jak w przypadku wykrywania obiektu, na podstawie pomiaru czasu powrotu echa sygnału można zmierzyć odległość pomiędzy nadajnikiem a obiektami.

W trakcie przemieszczania się statku powietrznego radar wysyła kolejne impulsy „oświetlając” sąsiedni, wąski pas terenu. W ten sposób tworzy się ciągły, czarno-biały obraz pasa terenu położony z boku SP i równoległy do kierunku lotu. Szerokość pasa obrazowania, w zależności od rodzaju platformy i wysokości lotu i dla radarów SLAR, może wynosić nawet powyżej 100 km.



■ Rys. 5.2. Zasada działania radaru obrazowego: a) propagacja jednego impulsu radarowego (wskazującego położenie czoła fali w momentach czasowych 1+17); b) sygnał odbierany przez antenę [48]

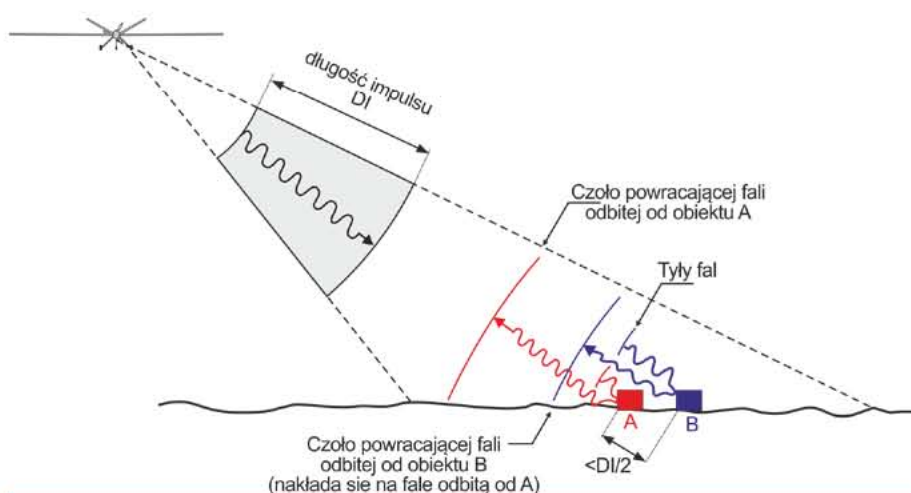


■ Rys. 5.3. Istota działania radaru obrazowego [48]

Obraz uzyskany za pomocą radaru przypomina czarno-białe zdjęcie lotnicze. Zdjęciem jednak nie jest zarówno w sensie właściwości geometrycznych otrzymanego zobrazowania, jak i rozkładu jego tonów szarości. Gęstość optyczna obrazu radarowego

jest miarą energii odbitych od obiektów terenowych impulsów radarowych, która zależy głównie od długości fali, na której pracuje radar oraz „chropowatości” i właściwości dielektrycznych obiektów. Sygnał radarowy w różnym stopniu przenika przez szatę roślinną, korony drzew. W zakresie dłuższych fal energia przenika przez roślinność, a odbicie następuje od gruntu. Część energii przenika pod powierzchnię gruntu i powraca, niosąc informację o warstwie podpowierzchniowej.

Jakość zobrazowania radarowego zależy od zdolności radaru do rozróżniania blisko siebie położonych obiektów, o czym decyduje wielkość komórki rozróżnialności. To, jak duża powinna być komórka rozróżnialności, aby uzyskać obraz spełniający wymogi użytkownika, zależy od jego przeznaczenia. Na jej wielkość mają wpływ jego dwa parametry: długość impulsu sygnału radarowego (określana przez czas trwania impulsu τ (rys. 5.1) oraz szerokość wiązki antenowej (rys. 5.3). Długość impulsu sygnału (rys. 5.4) decydująca o rozdzielczości przestrzennej w kierunku propagacji energii i określana jest jako rozróżnialność w odległości, natomiast szerokość wiązki antenowej określa rozmiar komórki rozróżnialności w kierunku lotu, czyli azymutu.



■ Rys. 5.4. Zależność rozróżnialności odległości od długości impulsu [48]

5.1.2. ROZRÓŻNIALNOŚĆ ODLEGŁOŚCIOWA

Aby system radarowy mógł oddzielnie zobrazować dwa obiekty terenowe znajdujące się blisko siebie w kierunku odległości, sygnały odbite od dwóch obiektów powinny być odbierane przez antenę oddzielnie. Nakładanie się w czasie sygnałów odbitych od dwóch obiektów spowoduje, że ich obrazy będą rozmyte (rys. 5.4). Jeśli impuls o długości DI został wysłany w kierunku obiektów A i B, pomiędzy którymi odległość ukośna (na kierunku propagacji sygnału) jest mniejsza niż $DI/2$, to miał on czas na przebycie drogi do B i powrót jego echa do A, podczas gdy koniec impulsu

KRYTERIA DETEKCJI, ROZPOZNANIA, IDENTYFIKACJI I LOKALIZACJI OBIEKTÓW

Podstawowymi właściwościami określającymi przydatność danego urządzenia obserwacyjnego są jego zdolności detekcji celów oraz ich rozpoznania i identyfikacji DRI (ang. *Detection, Recognition, Identification*). Pojęcia te są wspólne dla wszystkich modeli wyznaczania właściwości obrazowych i zostały scharakteryzowane poniżej [14].

DETEKCJA jest to zdolność do odnalezienia lub odkrycia obecności instalacji, przedmiotu, działalności lub obiektu zainteresowania, oparta na jego kształcie (konfiguracji) lub na innej informacji wydobytej z kontekstu fotografowanej sceny. Na rys. 10.1.a widać szereg prostokątnych obiektów znajdujących się przed budynkiem. Na podstawie kształtu obiektów, sposobu ich rozmieszczenia, geometrii budynku (dłuższy niż szerszy), nawierzchni betonowej można stwierdzić, iż są to pojazdy o dużej masie zaparkowane przed garażem.

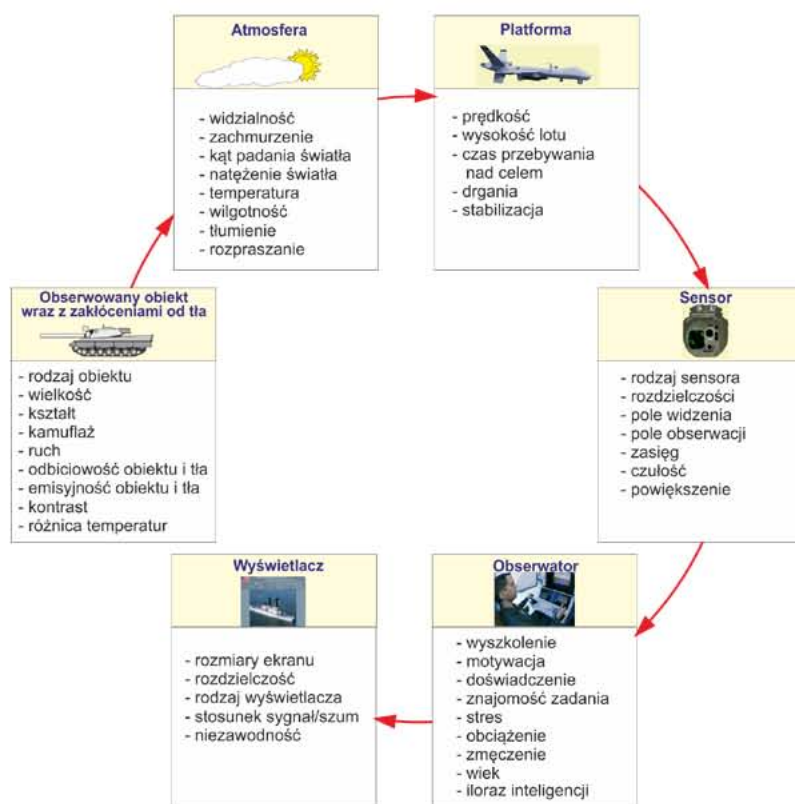
ROZPOZNANIE natomiast jest zdolnością do określenia, że dwa dostrzegane przedmioty (obiekty) są różnych typów albo klas, opierając się na jednej lub więcej cechach tych obiektów. Na omawianym przykładzie można zauważyć lufy oraz charakterystyczny kształt wieżyczek. Można więc stwierdzić, iż są to czołgi (rys. 10.1.b).

IDENTYFIKACJA jest zdolnością prawidłowego nazywania przedmiotu (obektu) do określenia jego typu lub klasy, opartą głównie na jego konfiguracji i charakterystycznych elementach. Identyfikacja zależy od obserwacji szczegółów na obrazie, a nie od informacji pochodzącej z innych źródeł niż obraz. W omawianym przykładzie będzie to czołg T-72. Na podstawie tej informacji można wykonać opis techniczny danego obiektu (rys. 10.1.b).



■ Rys. 10.1. Stopnie rozpoznania obrazowego: a) detekcja, b) rozpoznanie, c) identyfikacja [14]

Na to, z jakim prawdopodobieństwem operator BSP czy interpretator są w stanie zrealizować te zadania, wpływa wiele czynników: parametry elementów użytych do budowy kamery monitora, platforma, na której sensory są zainstalowane, warunki atmosferyczne, parametry poszukiwanego celu oraz doświadczenie obserwatora (rys. 10.2). Znajomość wymienionych wyżej zmiennych jest bardzo ważna przy doborze sprzętu obserwacyjnego, szkoleniu personelu oraz planowaniu działań obserwacyjnych na polu walki.



■ Rys. 10.2. Czynniki wpływające na detekcję, rozpoznanie i identyfikację obiektów przez obserwatora [opr. wł. na podst. 139]

Znaczenie detekcji celu zależy od okoliczności, w jakich prowadzone są działania operacyjne. Działania te, mające na celu detekcję danego obiektu, są procesem ciągłym. W początkowym etapie obserwator skanuje obszar zainteresowania urządzeniem o szerokim polu widzenia, a dopiero po zauważeniu obiektu budzącego zainteresowanie z punktu widzenia prowadzonych działań zmienia nastawienia w celu zwężenia pola widzenia. Daje to możliwość bliższej, bardziej dokładnej analizy potencjalnego celu. W praktyce etapy te występują naprzemiennie, a obserwator zanim potwierdzi detekcję celu, kilkakrotnie przełącza pola widzenia. Doświadczenia pokazują, że posiadając dobrej jakości sensor oraz mając wiele celów do detekcji, taka zmiana pola widzenia następuje trzykrotnie, zanim osoba prowadząca obserwację potwierdzi detekcję celu. Przy mniejszej ilości celów lub podczas obserwacji z użyciem sensora o gorszych parametrach przełączanie trybu kamery z szerokiego na wąskie pole widzenia i odwrotnie następuje wielokrotnie.

Sensor jest określany jako „obrazowy”, jeśli przedstawia swoje dane wyjściowe w formie, która może być interpretowana przez operatora jako obraz tego, co widzi sensor. W przypadku sensora elektrooptycznego jest to obraz widzialnej części widma taki, do jakiego każdy człowiek jest przyzwyczajony. Jeśli sensor działa w bliskiej podczerwieni, obraz (w tym przypadku prawie zawsze monochromatyczny) ma pewne nieznanne człowiekowi cechy związane z odwzorowaniem roślinności i terenu w podczerwieni, ale ogólne cechy sceny są znane. Jeśli sensor pracuje w średniej lub dalekiej podczerwieni, prezentowany obraz przedstawia zmiany temperatury i emisyjności obiektów w scenie. Przedstawiony operatorowi obraz termiczny ma cechy obrazu z pasma widzialnego, ale interpretacja szczegółów sceny termicznej wymaga zaznajomienia się z nią i przeszkolenia. Intuicyjne wrażenia, wynikające z wieloletniego doświadczenia z wyglądem przedmiotów w zakresie widzialnym, mogą być mylące podczas obserwacji obrazu w podczerwieni. Podobnie jest w przypadku sensorów radarowych dostarczających obrazów syntetycznych, zawierających „fałszywe” kolory, które przekazują informacje o ruchu obiektów i innych cechach sceny, które różnią się od rzeczywistych kolorów obiektów w scenie. Syntetyczny obraz jest zazwyczaj zaprojektowany tak, aby operator mógł go intuicyjnie zinterpretować, jednak w przypadku obrazów radarowych szkolenie i doświadczenie są jeszcze ważniejsze niż w przypadku obrazów termicznych.

Zakładając nawet, że sensor jest doskonały, czyli bez zniekształceń detektora, rozmycia optycznego i szumów, zasięg detekcji nadal ograniczony jest naturalną budową ludzkiego oka, które postrzega poszczególne elementy całościowo, łącząc linie i powierzchnie. Człowiek zdolny jest rozróżnić kształt celu znajdującego się bezpośrednio przed niejednorodnym tłem. Perspektywę uzyskuje się z linii zbieżnych, różniących się między sobą ostrością oraz luminancją, zmieniających się wraz z odległością. Drobne zmiany odcienia szarości czy tekstury mogą przyczynić się do lepszej oceny odległości czy orientacji celu, a nawet do rozpoznania rodzaju powierzchni.

Od dobrego obserwatora oczekuje się zatem zdolności wychwycenia nieznacznych zmian w odcieniach szarości, a nie tylko umiejętności rozróżniania niewielkich szczegółów, wyróżniających się wysokim kontrastem. Zagadnienie dotyczące umiejętności obserwatora – interpretatora obrazów jest bardzo obszerne i wykracza poza ramy tego opracowania, stąd też jest w tej pracy tylko zasygnalizowane.

Biorąc pod uwagę ograniczenia człowieka – obserwatora, sensor powinien dostarczać mu jak najlepszej jakości obraz pozwalający wychwycić jak najwięcej istotnych szczegółów. Istnieje wiele sposobów oceny i opisu jakości obrazu, których wykorzystanie zależy od rodzaju danego zastosowania. Można je podzielić na dwie grupy: metody ilościowe, pozwalające na oszacowanie zasięgów DRI, oraz jakościowe, pozwalające ocenić obrazy pod względem ich właściwości interpretacyjnych.

Każde z tych podejść stanowi równowagę między dwoma podstawowymi ograniczeniami każdego sensora EO: rozdzielczością (jak mała) (rys. 10.3.b) i czułością (jak słaba) (rys. 10.3.c), czyli jak mały obiekt lub cecha mogą być zaobserwowane i jak niski może być sygnał, zanim zostanie zdominowany przez szum. W sensorach cyfrowych do tych klasycznych czynników dołączył trzeci – częstotliwość próbkowania sensora (rys. 10.3.d).



a) obraz oryginalny



b) obraz o niskiej rozdzielczości



c) obraz zaszumiony



d) obraz o niskim próbkowaniu

■ Rys. 10.3. Porównanie obrazów: a) oryginalnego, b) o niskiej rozdzielczości, c) zaszumionego, d) uzyskanego z sensora o niskim próbkowaniu [opr. wł.]

Konstrukcja sensora jest wynikiem kompromisu między tymi trzema czynnikami, w odniesieniu do charakterystyki celu oraz środowiska. Dla każdego sensora i zastosowanej technologii może się zdarzyć, że sensor ma ograniczony stosunek sygnału do szumu SNR (rozdz. 7). W takim przypadku SNR jest najważniejszym parametrem i można opracować zasady postępowania, aby skupić się na wartości tego parametru w odniesieniu dla danego celu i środowiska. W innych przypadkach sensor ma ograniczoną rozdzielczość, a najważniejsza jest charakterystyka układu optycznego (MTF); przy czym uznaje się, że idealny sensor jest ograniczony dyfrakcyjnie i może reagować na częstotliwości przestrzenne do granicy dyfrakcji (rozdz. 7.1.5). Wówczas można opracować reguły postępowania, które koncentrują się na układzie optycznym. W przypadku sensorów ograniczonych próbkowaniem istotnym parametrem jest warunek Nyquista.

10.1. ILOŚCIOWE METODY OKREŚLANIA ZASIĘGÓW DRI

W grupie tej można wyróżnić dwie najbardziej znane metody, tj. najstarszą (opracowaną w latach 1957–1958) i najbardziej rozpowszechnioną metodę – kryterium Johnsona oraz najnowszą, najbardziej kompleksową i wiarygodną – metodę TTP (ang. *Targeting Task Performance Metric*).

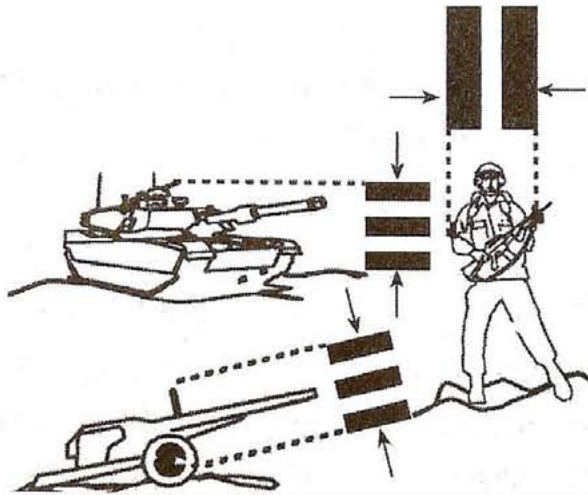
Istnieją również metody dedykowane dla konkretnego rodzaju sensora, tak jak w przypadku kamer termowizyjnych oprócz wymienionych powyżej metod wykorzystuje się dodatkowo 7 metod, wśród których najbardziej popularne są: model FLIR92 i Thermal Range Model – TRM [4].

10.1.1. KRYTERIUM JOHNSONA

Pierwsze sformalizowane podejście do kryteriów związane z detekcją i identyfikacją celów w zakresie widzialnym i bliskiej podczerwieni zostało opracowane przez Johna Johnsona. Johnson podzielił percepcję wzrokową na cztery kategorie: detekcję, orientację, rozpoznawanie i identyfikację. W trakcie badań zauważył korelację pomiędzy większą liczbą cykli (par pasa czarnego i białego) (rozdz. 7.1.2) obejmujących obraz obiektu a zwiększeniem prawdopodobieństwa percepcji tego obiektu przez obserwatora. Johnson opracował swoją metodologię, wykorzystując przeskalowane modele ośmiu pojazdów wojskowych i postać żołnierza umieszczone na jednolitym tle. Obserwatorzy obserwowali cele przez wzmacniacze obrazu, a ich zadaniem była ich detekcja, określenie orientacji, rozpoznanie i identyfikacja. Jednocześnie obserwowali trójpaskowy test USAF-1951 (rozdz. 6.2), którego pasy miały taki sam kontrast jak skalowane modele. W ten sposób poziom percepcji obiektu został skorelowany z rozdzielczością przestrzenną testu paskowego (rys. 10.4).

Eksperymenty wykazały, że dla danej geometrii celu krytyczny jest wymiar minimalny, a nie maksymalny. Wartości średnie częstości przestrzennych dla różnych obiektów i poziomów percepcji określonych przez kryterium Johnsona przedstawiono

w tabeli 10.1. Dane odnoszą się dla sytuacji, w których zachowany jest stosunek kontrastu w obrazach podstawowych i transformowanych, poziom percepcji nie zależy od stosunku sygnału do szumu oraz przy założeniu 50% prawdopodobieństwa percepcji (tabela 10.1).

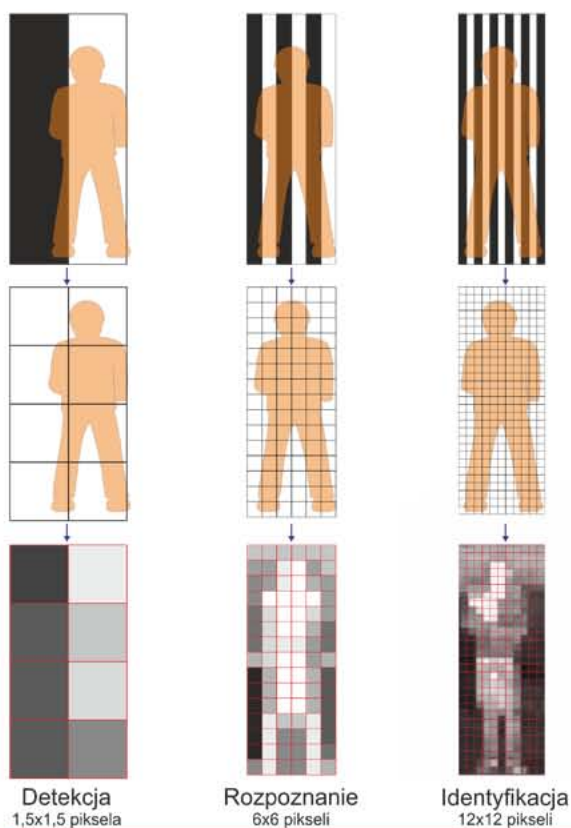


■ Rys. 10.4. Cele wykorzystywane przez Johnsona do badań [27]

■ Tabela 10.1. Parametry kryterium Johnsona [opr. wł. na podst. 27]

| Poziom percepcji | Ilość cykli w poprzek minimalnego wymiaru celu | Opis celu obserwacji osiąganego w danym kryterium |
|------------------|--|---|
| Detekcja | $1,0 \pm 0,25$ | Obiekt o potencjalnym znaczeniu militarnym |
| Orientacja | $1,4 \pm 0,35$ | Obiekt jest w przybliżeniu symetryczny lub niesymetryczny, a jego orientacja może być rozróżniona (widok z boku i widok z przodu) |
| Rozpoznanie | $4,0 \pm 0,8$ | Klasa obiektu (czołg, samochód itp.) |
| Identyfikacja | $6,4 \pm 1,5$ | Możliwość określenia typu czołgu, np. T-80 |

Kryterium Johnsona było wielokrotnie modyfikowane i obecnie w odniesieniu do sensorów cyfrowych dla kryterium detekcji przyjmuje się, że obiekt musi mieć wielkość minimum $1,5 \times 1,5$ piksela. Wielkość 1,5 piksela jest odpowiednikiem 0,75 cyklu dla przestrzennej rozdzielczości celu. W kryterium rozpoznania minimalna liczba pikseli wynosi 6×6 , a dla identyfikacji 12×12 pikseli (rys. 10.5).



■ Rys. 10.5. Liczba pikseli na celu niezbędna do: detekcji, rozpoznania i identyfikacji [opr. wł.]

Badania poligonowe pozwoliły na określenie wymaganej liczby par linii dla określonych grup celów (tabela 10.2).

■ Tabela 10.2. Wymagana liczba par linii potrzebna do detekcji, rozpoznania i identyfikacji wybranej grupy celów według zmodyfikowanego kryterium Johnsona [opr. wł. na podst. 3]

| Rodzaj celu | Wymagana liczba par linii | | |
|---------------------|---------------------------|-------------|---------------|
| | Detekcja | Rozpoznanie | Identyfikacja |
| Samochód ciężarowy | 0,90 | 4,50 | 8,00 |
| Czołg M-48 | 0,70 | 3,50 | 7,00 |
| Czołg T-72 | 0,75 | 3,30 | 6,00 |
| Półciężarówka | 1,00 | 4,00 | 5,00 |
| Jeep | 1,20 | 4,50 | 5,50 |
| Samochód dowodzenia | 1,20 | 4,30 | 5,50 |
| Żołnierz stojący | 1,50 | 3,80 | 8,00 |
| Haubica 105 | 1,00 | 4,80 | 6,00 |
| Wartość średnia | 1,00 ±0,25 | 4,00 ±0,35 | 6,40 ±1,50 |

WIELOSENSOROWE SYSTEMY OBSERWACYJNE BSP

Bezzałogowe statki powietrzne są przeznaczone do przenoszenia ładunku użytecznego (ang. *payload*) i wykonania określonej misji lotniczej. Ładunek użyteczny to masa sensorów, urządzeń i uzbrojenia, którą BSP może przenieść i bez których może wykonać lot. Definicja ta oznacza, że wszystkie urządzenia i sensory, które są niezbędne do wykonania lotu, np.: system łączności, autopilot oraz sensory systemu nawigacji, takie jak akcelerometry, żyroskopy i magnetometry, nie są traktowane jako ładunek użyteczny.

Masa ładunku użytecznego zależy od klasy BSP oraz zadań, do których wykonywania jest przeznaczony. W tabeli 11.1 przedstawiono charakterystykę kilku dużych i małych BSP, które zostały uszeregowane od największej do najmniejszej maksymalnej masy startowej MTOW (ang. *Maximum Take Off Weight*). W ostatniej kolumnie tabeli zawarty jest stosunek masy ładunku użytecznego PW (ang. *Payload Weight*) do MTOW, który zawiera się w granicach od 0,09 (RQ-4 Global Hawk) do 0,38 (MQ-9B Sky Guardian).

■ Tabela 11.1. Stosunek masy ładunków użytecznych wybranych BSP różnych klas, uszeregowane według maksymalnej masy startowej MTOW [opr. wł. na podst. 72]

| Lp. | Typ BSP | Długość trwania lotu [godz.] | Zasięg [km] | MTOW [kg] | PW [kg] | PW / MTOW |
|-----|---------------------------|------------------------------|-------------|-----------|---------|-----------|
| 1 | RQ-4 Global Hawk | 32 | 22 800 | 14625 | 1360 | 0,093 |
| 2 | MQ-9B Sky Guardian | 30 | 11 000 | 4500 | 1700 | 0,38 |
| 3 | A-160 Hummingbird | 24 | 4 023 | 2948 | 453 | 0,15 |
| 4 | Northrop Grumman Firebird | 40 | 11 200 | 2267 | 562 | 0,25 |
| 5 | MQ-1C Gray Eagle | 30 | 3750 | 1633 | 363 | 0,22 |
| 6 | MQ-8 Fire Scout | 8 | 203 | 1428 | 227 | 0,16 |
| 7 | RQ-5 Hunter | 21 | 125 | 885 | 90 | 0,10 |
| 8 | Bayraktar TB2 | 27 | 300 | 650 | 150 | 0,23 |
| 9 | RQ-7B Shadow | 7 | 110 | 170 | 45,3 | 0,27 |
| 10 | Killer Bee | 18 | 100 | 113 | 9 | 0,08 |

| Lp | Typ BSP | Długość trwania lotu [godz.] | Zasięg [km] | MTOW [kg] | Payload Weight PW [kg] | PW / MTOW |
|----|---------------------|------------------------------|-------------|-----------|------------------------|-----------|
| 11 | Yamaha RMAX | 1 | 90 | 94 | 31 | 0,33 |
| 12 | Black Eagle 50 | 4 | 260 | 35 | 10 | 0,28 |
| 13 | Scan Eagle | 23 | 100 | 22 | 5,9 | 0,27 |
| 14 | DJI Matrice 600 Pro | 34 min | – | 15,5 | 1,0 | 0,065 |
| | | 18 min | | | 5,5 | 0,35 |
| 15 | Silver Fox | 12 | 32 | 12,7 | 1,8 | 0,14 |
| 16 | Fly Eye | 2,5 | 50 | 11 | <2,0 | 0,18 |
| 17 | Raven RQ-11B | 1,5 | 10 | 1,9 | 0,18 | 0,097 |

Wyróżnia się pięć głównych klas ładunków użytecznych dla BSP:

- sensory obrazowe, obserwacji i nadzorowania (elektrooptyczne, podczerwieni, radar, lidar, sensory wielo i hiperspektralne) (rys. 11.1);
- sensory naukowe (monitorowania i pomiaru parametrów środowiskowych i atmosferycznych);
- wojskowe (pociski raketowe, bomby);
- walki elektronicznej (urządzenia detekcji, rozpoznania, zakłócania oraz mylenie urządzeń elektronicznych przeciwnika);
- towary (dostawa materiałów medycznych, żywienia itp.).



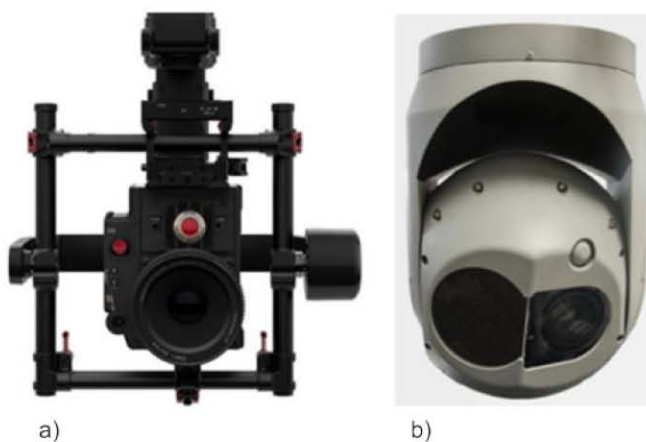
■ Rys. 11.1. Urządzenia systemu obserwacyjnego MQ-8 Reaper [144]

Funkcja obserwacyjna od początku wykorzystywania BSP była podstawowym zastosowaniem i pozostaje jedną z podstawowych funkcji, nawet po rozpoczęciu wykorzystania BSP do innych zastosowań, takich jak walka elektroniczna, wyznaczanie celów czy przenoszenie broni.

Zadania związane z rozpoznaniem i nadzorem kładą nacisk na sensory działające w czasie rzeczywistym, bez potrzeby długotrwałego przetwarzania obrazów w celu umożliwienia ich wykorzystania. Oznacza to, że najczęściej stosowane są sensory elektrooptyczne, podczerwieni oraz rzadziej radary SAR. Inne systemy obrazowania, takie jak lidar czy sensory wielo i hiperspektralne, wykorzystywane są na specjalistycznych systemach bezzałogowych.

Istotnym czynnikiem decydującym o tym, jakie sensory mogą być zastosowane, jest maksymalna masa ładunku użytecznego, jaki jest w stanie przenieść BSP. Mimo postępu w konstrukcji sensorów i zmniejszaniu ich masy, przy coraz większych ich możliwościach, masa niektórych sensorów może być zbyt duża dla BSP klasy mikro, a nawet taktycznej. Jakkolwiek na każdym BSP zastosowany jest sensor elektrooptyczny, to jego możliwości mogą być różne. Kamera Zenmuse X3 o masie 201 g ma mniejsze możliwości niż kamera DJI Zenmuse H20 o masie 673 g czy system ViDAR zastosowany między innymi na Scan Eagle, który posiada nie tylko funkcje obrazowania, ale również automatycznej detekcji i rozpoznania.

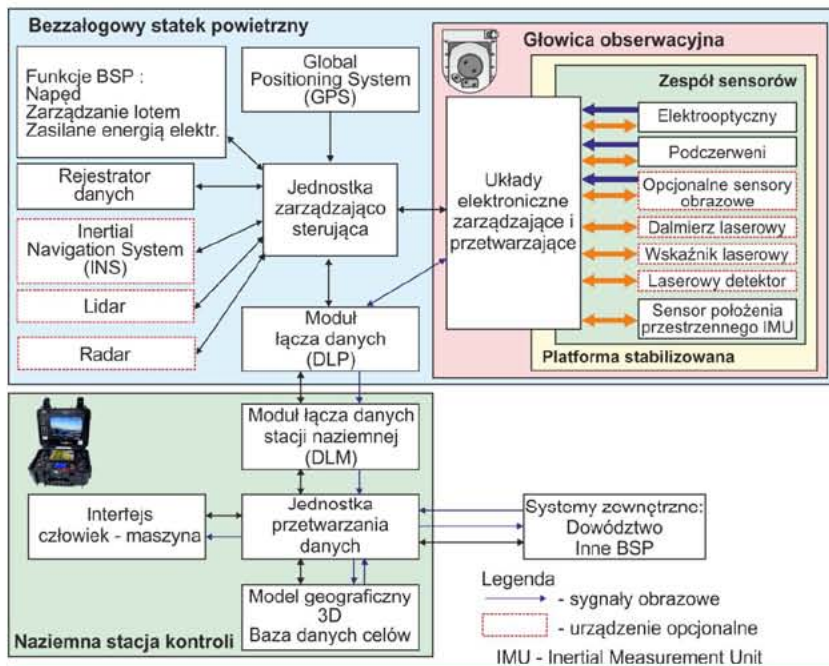
Największe wymagania, jeśli chodzi o możliwości udźwigu, mają radary SAR, których masy w chwili obecnej wynoszą powyżej 8 kg (tabela 11.5).



■ Rys. 11.2. Sensory elektrooptyczne i podczerwieni zamocowane w: a) gimbalu, stosowanym przede wszystkim na wielowirnikowcach, b) głowicy obserwacyjnej [opr. wł.]

Bezzałogowy system obserwacyjny tworzą urządzenia znajdujące się na pokładzie BSP oraz stacji naziemnej, są to (rys. 11.3):

1. Na pokładzie BSP:
 - sensory obserwacyjne elektrooptyczne i termowizyjne wraz z urządzeniami sterującymi, zintegrowane w zespole mechanicznym lub głowicy obserwacyjnej (rys. 11.2) umożliwiającym orientację i stabilizację linii widzenia LOS (ang. *Line of Sight*). Radar SAR i lidar są urządzeniami opcjonalnymi i nie występują na każdym BSP;
 - moduł łącza danych DLP (ang. *Data Link Payload*), który kompresuje (jeśli to konieczne) dane obrazowe i przesyła je do naziemnej stacji kontroli i sterowania GCS (ang. *Ground Control Station*);
 - jednostka zarządzająco-sterująca, która odbiera polecenia operatora poprzez moduł DLP i przekazuje je do innych urządzeń i systemów BSP.
2. W naziemnej stacji kontroli GCS (ang. *Ground Control Station*):
 - moduł łącza danych stacji naziemnej DLM (ang. *Data Link Module*) realizujący kodowanie/dekodowanie obrazów i danych;
 - jednostka przetwarzania danych wykonująca dodatkowe przetwarzanie obrazów i danych wysyłanych przez BSP oraz przetwarzanie danych i poleceń odebranych z interfejsu człowiek-maszyna;
 - interfejs człowiek-maszyna zapewniający przekazywanie komend i parametrów niezbędnych do realizacji misji oraz prezentację zobrazowań i danych operatorowi systemu BSP.








■ Rys. 11.3. Przykład architektury systemu obserwacyjnego BSP [opr. wł.]

11.1. GŁOWICE OBSERWACYJNE

Najczęściej sensory elektrooptyczne i podczerwieni umieszczone są w głowicach obserwacyjnych, przy czym w zależności od klasy BSP i możliwości udźwigu ładunku użytecznego ich parametry znacznie się różnią. Przykładem jest rodzina głowic obserwacyjnych bliskiego i średniego zasięgu oferowana przez firmę Controp (tabela 11.2, rys. 11.4).

■ Tabela 11.2. Porównanie parametrów głowic obserwacyjnych firmy CONTROP [opr. wł. na podst. 145]

| Parametr |  |  |  |  |  |
|--|---|---|---|--|---|
| | Micro STAMP | D-STAMP | M-STAMP | T-STAMP-XD | TR-STAMP |
| Masa [kg] | 0,3 | 0,86 | 1,36 | 5,75 | 6,3 |
| Średnica [mm] | 85 | 130 | 152 | 220 | 212 |
| Zasięg detekcji sensora termowizyjnego do celu NATO [km] | 1,8 | 6,0 | 10 | 15 | 14 |
| Pole obserwacji: - elewacja [°] - azymut [°] | | +70+ -40 ±170 | +70+ -40 ±170 | +30+ -120 360 | - - |
| Moc zasilania [W] | | 11 | 23 | 65 średnio 150 maks. | - |
| Sensor termowizyjny | | | | | |
| Zakres częstotliwości [μm] | | | 8- 12 | 3- 5 | - |
| Detektor | | | 640 × 480 mikrobolom. | 640 × 512 | - |
| Obiektyw zoom | | | opt. × 3,2 | el. × 4,0 | - |
| Pole widzenia FOV - azymut [°] | | | 37+ 11,7 | 30+ 2,0 | - |
| Sensor elektrooptyczny | | | | | |
| Detektor | | 1280 × 720 | 1280 × 720 | 1280 × 720 | - |
| Obiektyw zoom | | opt. × 20 | el. × 4 | el. × 4 | - |
| Pole widzenia FOV - azymut [°] | | 40+ 2,0 | 40+ 2,0 | 38+ 2,3 | - |



LITERATURA

1. *Atmospheric Effects on EO Sensors and Systems*. Naval Meteorology and Oceanography Professional Development Detachment Atlantic 2005.
2. Austin R., *Unmanned Aircraft Systems*. Willey 2011.
3. Bareła J., Kastek M., Firmanty K., *Wyznaczanie parametrów zasięgowych urządzeń obserwacyjnych na podstawie pomiarów laboratoryjnych*. Problemy Mechatroniki: Uzbrojenie, Lotnictwo, Inżynieria Bezpieczeństwa 2014, 5, 2(16), 47–62.
4. Bareła J., Firmanty K., Kastek M., *Measurement and Analysis of the Parameters of Modern Long-Range Thermal Imaging Cameras*. Sensors 2021, 21(17), 5700, <https://doi.org/10.3390/s21175700> [dostęp: 25.09.2022].
5. Bareła J., Dulski R.P., Karol M., Kastek M., Kowalski M., Markowski P., Szustakowski M., Życzkowski M., *Dalekozasięgowa kamera do monitorowania obiektów infrastruktury krytycznej: testy zasięgowe*. Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza 2014, 36, 4, ss. 103–111.
6. Booth K., *Optoelektronika*. WKiŁ, 1998.
7. Boreman G.D., *Modulation Transfer Function In optical and Electro-Optical Systems*. Second edition. SPIE Press 2021.
8. Broekaert M., Duclos D., Sirieix M., *Image processing for tactical UAV*. <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a472219.pdf> [dostęp: 25.09.2022].
9. Brooker G., *Introduction to sensors for ranging and imaging*. Scitech Publishing 2009.
10. Campbell J.B., Wynne R.H., *Introduction to remote sensing*. Guilford Press 2011.
11. Clark R.M., *The technical collection of intelligence*. CQ Press 2011.
12. Cramer M., Zhang S., Meisner H., Reulke R., *Quality assessment of high-resolution UAV imagery and products*. 40. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF in Stuttgart – Publikationen der DGPF, Band 29, 2020.
13. Davis M.E., *Foliage Penetration Radar: Detection and Characterization of Objects under Trees*. Raleigh, NC: SciTech Pub., 2011.
14. Dąbrowski R., Orych A., Walczykowski P., *Ocena możliwości wykorzystania wysokorozdzielczych zobrażeń satelitarnych w rozpoznaniu obrazowym*. Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji 2010, 21.

15. *Design of UAV systems – Payloads*. <https://studylib.net/doc/9220815/ase261.11.payload> [dostęp: 25.09.2022].
16. Domański M., *Obraz cyfrowy*. WKŁ 2010.
17. Dębski W., Walczykowski P., Orych A., *Dobór materiałów do wytworzenia pasywnych celów kalibracyjnych oraz metodyka wyznaczania terenowej zdolności rozdzielczej kamer i skanerów termalnych*. Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji 2008, 18.
18. Echard P., Lamarre H., Gosselin P., *Data & Image Fusion for Multisensor UAV Payload*. <https://www.sto.nato.int/publications/STO%20Meeting%20Proceedings/RTO-MP-SET-092/MP-SET-092-12.pdf> [dostęp: 29.09.2022].
19. Fahlstrom P.G., Gleason T.J., *Introduction to UAV systems*. Willey 2012.
20. *Geospatial Intelligence (GEOINT) Basic Doctrine*. National Geospatial Intelligence Agency 2018.
21. Hagen N., Kudenov M.W., *Review of snapshot spectral imaging technologies*. Optical Engineering 2013, 52(9), 090901.
22. *Handbook of Optoelectronics*. ed. Dakin J., Brown R.G.W., 1 edition, CRC Press 2006.
23. *Handbook of Unmanned Aerial Vehicles*. ed. Valavanis K.P., Vachtsevanos G.J., Springer 2015.
24. Harney R., *Combat Systems. vol. 1: Sensors*. <http://index-of.co.uk/Tutorials-2/Combat%20System%20Sensors.pdf> [dostęp: 29.11.2019].
25. Hernandez J.H., *Operational assessment of target acquisitions weapon software (TAWs) prediction performance at Nellis Air Force Base NV*. Thesis. Naval Postgraduate School, 2006.
26. Hintz R.T., *Survey of Sensor Payloads for UAVs*. <https://pdfs.semanticscholar.org/feb6/672959b4ee886432d6090044ac1ff39c2e15.pdf> [dostęp: 29.11.2019].
27. Holst G.C., *Electro-Optical Imaging System Performance*, Sixth Edition. JCD Publishing, SPIE Press 2017.
28. Hosseinpour H.R., Samadzadegan F., DadrasJavan F., *Precise target geolocation and tracking based on UAV video imagery*. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLI-B6, 2016 XXIII ISPRS Congress, 12–19 July 2016, Prague, Czech Republic.
29. *Imagery Intelligence. MCRP 2-10B.5*. US Marine Corps 2016. [https://www.marines.mil/Portals/1/Publications/MCRP%202-10B.5%20\(Formerly%20MCWP%202-21\).pdf?ver=2016-06-27-121606-730](https://www.marines.mil/Portals/1/Publications/MCRP%202-10B.5%20(Formerly%20MCWP%202-21).pdf?ver=2016-06-27-121606-730) [dostęp: 2.03.2021].
30. *Intelligence. Army Field Manual FM 2-0*. <https://archive.org/details/milmanual-fm-2-0-intelligence/page/n139> [dostęp: 2.03.2021].
31. *Introduction to Unmanned Aircraft Systems*. ed. Marshall D.M., Barnhart R.K., Shappee E., Most M.T., CRC Press 2 edition 2016.

32. Izdebski W., *Wykłady z systemów informacji o terenie*. 2015. <https://view.joomag.com/wyk%C5%82ady-z-system%C3%B3winformacji-o-terenie/0248527001421573009?short> [dostęp: 27.09.2022].
33. Jacobs J.A., *Thermal infrared characterization of ground targets and backgrounds*. SPIE Press 2006.
34. Jang S., Kim J., *Survey of electro - optical infrared sensors for UAV*. <https://www.kari.re.kr/lib/index.html> [dostęp: 2.03.2020].
35. Jaroszuk R., *Wykorzystanie satelitarnych i lotniczych danych obrazowych w rozpoznaniu wojskowym. I Konferencja naukowotechniczna: Wykorzystanie współczesnych zobrazowań satelitarnych, lotniczych i naziemnych dla potrzeb obronności kraju i gospodarki narodowej*. Zakopane 2006.
36. Józwicki R., Wawrzyniuk L., *Technika podczzerwieni*. Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej 2014.
37. Kaczyński R., Ewiak I., *Fotogrametria*. Wojskowa Akademia Techniczna 2016.
38. Klein L.A., *Sensor and data fusion. Second edition*. SPIE PRESS 2021.
39. Kołodziejczyk M., *Metoda radiacyjnego pomiaru temperatury z korekcją wpływu promieniowania słonecznego*. Rozprawa doktorska, Wojskowa Akademia Techniczna 2007.
40. Koretsky G.M., Nicoll J.F., Taylor M.S., *A Tutorial on Electro-Optical/Infrared (EO/IR) Theory and Systems*. Institute for Defence Analyses 2013.
41. Kovařík V., *Imagery Intelligence (IMINT)*. University of Defence, Faculty of Military Technology, Brno 2011.
42. Kurczyński Z., *Lotnicze i satelitarne obrazowanie Ziemi*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej 2006.
43. Leachtenauer J.C., Malila W., Irvine J., Colburn L., Salvaggio N., *General Image Quality Equation: GIQE*. *Appl. Opt.* 1997, 36(32), ss. 8322–28.
44. Lawrence A.K., *Sensor and Data Fusion: A Tool for Information Assessment and Decision Making*. 2nd edition, SPIE Press 2012.
45. Léchevin N., Laroche V., Roy S., Likuski K.E., Rea T., *Advanced Integrated Multi-sensing Surveillance (AIMS) – Capabilities for Future SAR and ISR Missions*. *The Royal Canadian Air Force Journal* 2013, 2, 3.
46. Lee C.G., Ee K.T., Heng Y.E., *Performance challenges for high resolution imaging sensors for surveillance in tropical environment*. *DSTA Horizons* 2015.
47. Li H., Wu X., Kittler J., *Infrared and Visible Image Fusion using a Deep Learning Framework*, https://www.researchgate.net/publication/324643997_Infrared_and_Visible_Image_Fusion_using_a_Deep_Learning_Framework [dostęp: 25.09.2022].
48. Lillesand T., Kiefer R.W., Chipman J., *Remote sensing and image interpretation*. 7 edition. Wiley 2015.
49. Lu J., *Design Technology of Synthetic Aperture Radar*. Wiley 2019.

50. Maj K., Pabisiak P., Stępień G., Wysota R., *Detekcja a identyfikacja*. Geodeta 2007, 9, ss. 26–31.
51. Minkina W., *Problems of Remote Temperature Measurement of Small Objects of Electricity Power Systems-On the Example of Lashing Clamps of Bridge Connections on High Voltage Poles*. Energies 2021, 14, 5041. <https://doi.org/10.3390/en14165041> [dostęp: 15.07.2022].
52. Minor J.L., *Flight test and evaluation of electro-optical sensor systems*, 33rd Annual SFTE Symposium 2002.
53. Minor J.L., *UAV payload sensors*. 2013 Annual SFTE Symposium, <http://www.sftentx.com/files/79496655.pdf> [dostęp: 29.11.2019].
54. Orych A., Walczykowski P., *Wyznaczanie terenowej zdolności rozdzielczej sensorów cyfrowych w oparciu o cele kalibracyjne*, Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji 2010, 21, ss. 291–300.
55. Orych A., *Review of methods for determining the spatial resolution of UAV sensors*, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-1/W4, 2015.
56. Osińska-Skotak K., *Metodyka wykorzystania super- i hiperspektralnych danych satelitarnych w analizie jakości wód śródlądowych*. Rozprawa habilitacyjna, Politechnika Warszawska 2009.
57. Parzych J., Hulewicz A., Krawiecki Z., *Matryce światłoczułe – właściwości, parametry, zastosowania*. Poznan University of Technology Journals, Electrical Engineering 2017, 92.
58. Petrie G., Walker A.S., *Airborne digital imaging technology: a new overview*. The Photogrammetric Record 2007, 22(119), ss. 203–225.
59. Pietruszka J., *Wojskowe analogowe opracowania kartograficzne a potrzeby geoinformacyjne bezpieczeństwa i obronności państwa*, Polski Przegląd Kartograficzny 2013, 45, 3, ss. 218–235.
60. Pohl Ch., Genderen J., *Remote sensing image fusion. A practical guide*, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2017.
61. *Podręcznik dla uczestników szkoleń z wykorzystania produktów LiDAR*, red. Wężyk P., Główny Urząd Geodezji i Kartografii 2015.
62. *Pomiary termowizyjne w praktyce*, red. Madura H.J., Wydawnictwo PAK 2004.
63. *Quantitative description of obscuration factors for electro-optical and millimeter wave systems*. Department of Defence handbook DoD-HDBK-178(ER), Washington 1986.
64. Richards M.A., Scheer J.A., Holm W.A., *Principles of Modern Radar*, Volume 1. SciTech Publishing, Inc. 2010.
65. Rogalski A., *Infrared and terahertz detectors, Third edition*. Boca Raton, FL: CRC Press 2019.
66. Rogalski A., Bielecki Z., *Detekcja sygnałów optycznych*, PWN 2020.

67. Rossum W.L., Grooters R., Halsema D., Lorga J.F.M., Otten M.P.G., Vermeulen B.C.B., Vlothuizen W.J., *Development of a Small Phased Array SAR-MTI System for Tactical UAV*. https://www.researchgate.net/publication/235027975_Development_of_a_Small_Phased_Array_SAR-MTI_System_for_Tactical_UAV [dostęp: 24.09.2022].
68. *Rozpoznanie obrazowe w systemie wywiadu strategicznego*. Narodowe Centrum Studiów Strategicznych 2016. <https://www.space24.pl/rozpoznanie-obrazowe-w-systemie-wywiadu-strategicznego?dp-1-page=2&dp-1-perpage=5#comments> [dostęp: 24.09.2022].
69. *Teledetekcja. Pozyskiwanie danych*. red. J. Sanecki, WNT 2006.
70. *Thermal Infrared Remote Sensing: Sensors, Methods, Applications*. ed. Kuenzer C., Dech S., Springer 2013.
71. *U.S. ARMY Unmanned Aircraft Systems roadmap 2010 – 2035*, <https://fas.org/irp/program/collect/uas-army.pdf> [dostęp: 24.09.2022].
72. Sadraey M., *Design of Unmanned Aerial Systems*. Wiley 2020.
73. Sandau R., *Digital airborne camera. Introduction and technology*. Springer 2010.
74. Schwartz C.E., Bryant T.G., Cosgrove J.H., Morse G.B., Noonan J.K., *A radar for unmanned air vehicles*. The Lincoln Laboratory Journal 1990, 3, 1.
75. Scheffs W., *Kierunki rozwoju rozpoznania wojskowego*. Zeszyty Naukowe AON 2013, 2(91).
76. Shaw G., Burke H.K., *Spectral Imaging for Remote Sensing*. Lincoln Laboratory Journal 2003, 14, 1.
77. Shirkey D.C., Gouveia M., *Weather-Impact Decision Aids: Software to Help Plan Optimal Sensor and System Performance*. The Journal of Defense Software Engineering, December 2002.
78. Sjaardema T.A., Smith C.S., Birch G.C., *History and Evolution of the Johnson Criteria*. Sandia National Laboratories. 2015. <https://www.osti.gov/servlets/purl/1222446> [dostęp: 25.09.2022].
79. Stanley R.M., *Intelligence Images from the Eastern Front*. Pen and Sword Military 2017.
80. Stark B., Chen Y., *Survey of Thermal Infrared Remote Sensing for Unmanned Aerial Systems*. International Conference on Unmanned Aircraft Systems, Orlando 2014.
81. *Unmanned System Integrated Roadmap. FY2013 – 2038*. Report – January 2014. <https://www.hsdl.org/?view&did=816179> [dostęp: 24.09.2022].
82. *Unmanned Aircraft System (UAS) Service Demand 2015 – 2035. Technical Report, Version 0.1*, September 2013. <https://fas.org/irp/program/collect/service.pdf> [dostęp: 24.09.2022].
83. *Unmanned Vehicles Handbook 2008*. https://www.uvsr.org/Documentatie%20UVS/Publicatii-nternationale/UV_Handbook-2008.pdf [dostęp: 29.11.2019].

84. Valenzuela A.Q., Reyes J.C.G., *Comparative study of the different versions of the General Image Quality Equations*. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 2019, IV-2/W5.
85. Vasile A.N., Marino R.M., *Pose-Independent Automatic Target Detection and Recognition Using 3D Laser Radar Imager*. Lincoln Laboratory Journal 2005, 15, 1.
86. Vollmer M., Möllmann K.P., *Infrared Thermal Imaging: Fundamentals, Research and Applications*. Wiley-VCH 2011.
87. Vollmerhausen R.H., Jacobs E., *The Targeting Task Performance (TTP) Metric - A New Model for Predicting Target Acquisition Performance*. Modeling and Simulation Division Night Vision and Electronic Sensors Directorate U.S. Army CERDEC Fort Belvoir, VA, Technical Report AMSEL-NV-TR-23, 20 April 2004.
88. Weatherington D.D., *Unmanned Aircraft systems sensors*. <https://pdfs.semanticscholar.org/74d1/6db37f4185258282b9c85879376827061906.pdf> [dostęp: 29.11.2019].
89. Więcek B., De Mey G., *Termowizja w podczerwieni. Podstawy i zastosowania*. Wydawnictwo PAK 2011.
90. Zawila-Niedźwiecki T., *Geomatyka w lasach państwowych. Część I. Rozdział 14: Teledetekcja i fotogrametria obszarów leśnych*. Dyrekcja Generalna Lasów Państwowych 2010.
91. <https://slideplayer.com/slide/4802059/15/images/13/Radiometric+Resolution.jpg> [dostęp: 20.09.2022].
92. https://en.wikipedia.org/wiki/Test_Stand_VII [dostęp: 20.09.2022].
93. <http://dib.joanneum.ac.at/edtr/satsys.html> [dostęp: 20.09.2022].
94. <https://aviationweek.com/defense-space/raytheon-adds-bands-multispectral-targeting> [dostęp: 20.09.2022].
95. www.researchgate.net/publication/246836455_Synthetic_Aperture_Radar [dostęp: 20.09.2022].
96. http://sar.kangwon.ac.kr/etc/rs_note/rsnote/cp2/2-1-1.gif [dostęp: 20.09.2022].
97. <https://www.semanticscholar.org/paper/Thermal-Infrared-Face-Recognition-%E2%80%93-A-Biometric-for-Bhowmik-Saha/ed35bd7208214e11cd4234e58af5b54b3c92a2da> [dostęp: 20.09.2022].
98. <https://www.thedigitalprocess.com/free-photography-lessons-level-2/learn-about-camera-lenses-a-guide/> [dostęp: 20.09.2022].
99. <https://www.kameryir.com.pl/z-jak-duzej-odleglosci-mozna-mierzyc/> [dostęp: 20.09.2022].
100. <https://landscapearchitecturemagazine.org/2017/05/25/high-fidelity/>
101. https://www.researchgate.net/figure/SAR-image-of-the-Petawawa-target-area-used-for-slow-moving-target-detection-Allmarked_fig14_3203471 [dostęp: 20.09.2022].

102. <https://newatlas.com/argus-is-darpa-gigapixel-camers/26078/> [dostęp: 20.09.2022].
103. www.parkcameras.com/blog/tips-and-inspiration/camera-lenses-explained_tips-07-05-2018-1 [dostęp: 20.09.2022].
104. <https://filmlifestyle.com/what-is-deep-depth-of-field/> [dostęp: 20.09.2022].
105. <https://medium.com/forensic-vr/rolling-shutter-problems-and-solutions-for-law-enforcement-cameras-part-1-9d8bddb35d4b> [dostęp: 20.09.2022].
106. <https://www.issibern.ch/forads/sr-009-23.pdf> [dostęp: 20.09.2022].
107. <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/introduction-to-cmos-image-sensors/> [dostęp: 20.09.2022].
108. <https://fotoblogia.pl/rodzaje-i-wielkosci-matryc-wszystko-co-powinienes-wiedziec-poradnik,6793597927618689a> [dostęp: 20.09.2022].
109. <https://optcorp.com/blogs/astrophotography-101/bayer-filter-system> [dostęp: 20.09.2022].
110. <https://en.wikipedia.org/wiki/Demosaicing> [dostęp: 20.09.2022].
111. <https://docplayer.pl/8101906-Spis-tresci-r-o-z-d-z-i-a-l-3-j-a-k-dzialacyfrowy-aparat-fotograficzny-25.html> [dostęp: 20.09.2022].
112. <https://silo.tips/download/termowizja-projekty-badawcze-i-wdroenia-przemysowe> [dostęp: 20.09.2022].
113. <https://akademiainzynierska.pl/wp-content/uploads/2022/04/Detektory-podczerwieni-w-Polsce.pdf> [dostęp: 20.09.2022].
114. <https://www.scd.co.il/products/blackbird-1920/#tabs-4> [dostęp: 20.09.2022].
115. <https://www.scd.co.il/products/bird-640-17/> [dostęp: 20.09.2022].
116. <https://www.ophiropt.com/infrared/lenses/lightir-20-275mm-f-5-5-5/> [dostęp: 20.09.2022].
117. <https://www.ricor.com/products/k561/> [dostęp: 20.09.2022]
118. www.radary.az.pl [dostęp: 20.09.2022].
119. https://eo4society.esa.int/wp-content/uploads/2021/02/D1T1b_LTC2015_Younis.pdf [dostęp: 24.09.2022].
120. <https://www.youtube.com/watch?v=bw2L21UmMYM> [dostęp: 20.09.2022].
121. Prezentacja Polskiego Holdingu Handlowego pt. „Bezzałogowy system lotniczy krótkiego zasięgu, Sensory rozpoznania elektronicznego”, Wicko 2014.
122. https://www.photonics.com/Articles/Army_Tests_Lidar_Geo-Mapping_at_Fort_Leonard_Wood/a6735 [dostęp: 20.09.2022].
123. Wójciak D., *Detekcja budynków z danych pochodzących z lotniczego skaningu laserowego z wykorzystaniem filtrów morfologicznych*. Praca dyplomowa magisterska, AGH 2012.
124. www.riegl.com [dostęp: 20.09.2022].
125. <https://www.geosage.com/highview/imagefusion.html> [dostęp: 20.09.2022].
126. *Optyka* 2015, 2(33).

127. <https://if.pw.edu.pl/~labopt/instrukcje/KOMO7.pdf> [dostęp: 20.09.2022].
128. <https://www.telescope-optics.net/mtf.htm> [dostęp: 20.09.2022].
129. <https://tecnochronica.wordpress.com/2017/01/19/que-es-el-aliasing-explicacion-y-efectos-curiosos/> [dostęp: 20.09.2022].
130. www.normankoren.com [dostęp: 20.09.2022].
131. www.imatest.com [dostęp: 20.09.2022].
132. <https://www.eckop.com/resources/optical-testing/resolution-testing-methods/> [dostęp: 20.09.2022].
133. <https://www.weather.gov/jetstream/energy> [dostęp: 20.09.2022].
134. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/atmos/blusky.html> [dostęp: 20.09.2022].
135. Helak M., *Analiza wpływu warunków prowadzenia obserwacji na możliwość wykrycia obiektów kamerą termowizyjną*. Praca inżynierska, Dęblin 2017
136. Klimczak D., *Maskowanie człowieka przed wykryciem przez kamerę termowizyjną*. Praca magisterska, Dęblin 2013.
137. <https://www.sciencephoto.com/media/230996/view/military-airfield-at-night-in-infrared> [dostęp: 20.09.2022].
138. <https://www.metabunk.org/attachments/garcia-pdf.32229/> [dostęp: 20.09.2022].
139. https://www.academia.edu/13727219/Target_Acquisition [dostęp: 20.09.2022].
140. https://sklep.delta.poznan.pl/download/Dahua_IP_2019_Q1__pl.pdf [dostęp: 20.09.2022].
141. https://irp.fas.org/imint/niirs_c/ [dostęp: 26.09.2022].
142. https://media.defense.gov/2017/Dec/29/2001862128/-1/-1/0/T_STEPHENSON_AIR_REFUELING_RECEIVER.PDF [dostęp: 26.09.2022].
143. <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA424895.pdf> [dostęp: 20.09.2022].
144. <https://i.stack.imgur.com/zmKUX.png> [dostęp: 20.09.2022].
145. <https://www.controp.com/> [dostęp: 20.09.2022].
146. <https://www.wbgroup.pl/> [dostęp: 20.09.2022].
147. <https://www.insitu.com/products/vidar> [dostęp: 20.09.2022].
148. www.youtube.com/watch?v=Z72QiI3GDGk [dostęp: 20.09.2022].
149. <https://www.youtube.com/watch?v=ImAYRHbWaC8> [dostęp: 20.09.2022].
150. <https://www.youtube.com/watch?v=MOUuxITR4eA> [dostęp: 20.09.2022].
151. <https://www.youtube.com/watch?v=gl-YTZpddNY> [dostęp: 6.11.2022].
152. <https://www.sandia.gov/radar/pathfinder-radar-isr-and-synthetic-aperture-radar-sar-systems/video/> [dostęp: 20.09.2022].
153. <https://slideplayer.com/slide/10220719/> [dostęp: 20.09.2022].
154. <https://www.unmannedsystemstechnology.com/2021/02/sar-mti-radar-for-common-operating-picture-in-uav-operations/> [dostęp: 20.09.2022].