

Radiowa i optyczna komunikacja Bezzałogowych Statków Powietrznych – przegląd rozwiązań

Krzysztof Szajewski

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Cybernetyki, ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa 46

Anna Szajewska

Akademia Pożarnicza, Wydział Inżynierii Bezpieczeństwa i Ochrony Ludności, ul. Słowackiego 52/54, 01-629 Warszawa

Damian Celejewski

Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, ul. Księcia Bolesława 6, 01-494 Warszawa

Streszczenie: W artykule przedstawiono przegląd współczesnych metod komunikacji stosowanych w bezzałogowych statkach powietrznych (BSP) w kontekście zastosowań militarnych. Omówiono klasyczne techniki radiowe, systemy o widmie rozproszonym oraz inne metody transmisji radiowej, które zapewniają dobrą komunikację, lecz jednocześnie są narażone na wykrycie i zakłócenia w środowisku walki radioelektronicznej. Szczególną uwagę poświęcono rozwijającym się technologiom komunikacji optycznej w podczerwieni, w tym systemom światłowodowym Tethered Fiber Optics (TFO), Spooled Fiber Optics (SFO) oraz transmisji w otwartej przestrzeni Free-Space Optics (FSO), które oferują wysoką przepustowość, niskie opóźnienia oraz odporność na zakłócenia elektromagnetyczne, choć wymagają precyzyjnego ukierunkowania i są podatne na warunki atmosferyczne. W odpowiedzi na rosnące wyzwania środowiska walki radioelektronicznej autorzy proponują nowatorską koncepcję bezemisyjnej komunikacji optycznej FSO, w której BSP nie emituje własnego sygnału, lecz odbija i moduluje wiązkę światła wysyłaną z naziemnej stacji kontrolnej przy pomocy elektro-optycznego modulatora opartego na zwierciadle piezoelektrycznym. Rozwiązanie to umożliwia dwukierunkową transmisję danych o wysokim poziomie bezpieczeństwa i odporności na zakłócenia, stanowiąc obiecującą alternatywę dla tradycyjnych metod komunikacji BSP, zwłaszcza w misjach specjalnych i rozpoznawczych wymagających niewykrywalności i niezawodności.

Słowa kluczowe: BSP, komunikacja optyczna, FSO, walka radioelektroniczna

1. Wprowadzenie

Współczesne pole walki zyskało nowy wymiar: łączność, która stała się dodatkową domeną prowadzenia działań wojennych. Szczególnie znaczenie ma rozwój nowoczesnych technologii komunikacyjnych, które umożliwiają skuteczne działanie w warunkach zakłóceń i przeciwdziałania ze strony przeciwnika. Na polu walki obserwowanym m.in. w konflikcie na Ukrainie, Bezzałogowe Statki Powietrzne (BSP) w połączeniu z zaawansowaną łącznością umożliwiają obserwację, rozpoznanie, precyzyjną lokalizację oraz skuteczne uderzenia. Klasyczne rozwiązania oparte na transmisjach radiowych narażone są

na zakłócenia lub wykrycie, a przeciwnik coraz skuteczniej stosuje systemy walki radioelektronicznej EW (ang. *Electronic Warfare*), które potrafią zakłócać sygnały satelitarne jak i naziemne transmisje radiowe, prowadząc do utraty kontroli nad BSP [1]. W tym kontekście coraz większą uwagę przyciągają technologie komunikacji optycznej, które mogą stanowić alternatywę dla krytycznych kanałów radiowych [2]. Łączność optyczna, w szczególności w paśmie podczerwieni, pozwala na przesyłanie danych w sposób trudniejszy do przechwycenia i zakłócenia, a jednocześnie oferuje duże przepustowości i niskie opóźnienia. Choć niektóre systemy komunikacji optycznej wymagają precyzyjnego ukierunkowania i mogą być podatne na warunki atmosferyczne, to w wielu sytuacjach bojowych ich odporność na zakłócenia elektroniczne czyni je niezwykle wartościowymi.

Współczesne systemy awioniki pokładowej BSP w dużym stopniu przypominają rozwiązania stosowane w załogowych statkach powietrznych. Obejmują one m.in. układy sterowania napędem, systemy zasilania elektrycznego, sensory optyczne, nawigacji oraz sterowania lotem. W zależności od stopnia autonomii BSP, dane z tych systemów mogą być przetwarzane lokalnie, na pokładzie lub są przesyłane do Naziemnej Stacji

Autor korespondujący:

Krzysztof Szajewski, krzysztof.szajewski@wat.edu.pl

Artykuł recenzowany

nadesłany 31.07.2025 r., przyjęty do druku 22.01.2026 r.



Zezwala się na korzystanie z artykułu na warunkach licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 4.0 Int.

Wykaz skrótów

AO	<i>Adaptive Optics</i> – optyka adaptacyjna	LoS	<i>Line of Sight</i> – linia widoczności
APT	<i>Acquisition, Pointing and Tracking</i> – akwizycja, naprowadzanie i śledzenie wiązki	LTE	<i>Long Term Evolution</i> – standard komunikacji 4G
BSP	Bezzałogowy Statek Powietrzny	MEMS	<i>Micro-Electro-Mechanical Systems</i> – mikrosystemy elektromechaniczne
BSM	<i>Beam Steering Mirrors</i> – lustra z elektronicznie sterowanym położeniem	MFDM	<i>Magnetic Fluid Deformable Mirror</i> – deformowalne zwierciadło z cieczą magnetyczną
BVLOS	<i>Beyond Visual Line of Sight</i> – operacje poza zasięgiem widoczności wzrokowej	MIMO	<i>Multiple Input Multiple Output</i> – system wieloantenny
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i> – wielodostęp z podziałem kodowym	MMF	<i>Multimode Fiber</i> – światłowód wielomodowy
CNN	<i>Convolutional Neural Network</i> – splotowa sieć neuronowa	NSK	Naziemna Stacja Kontroli
COFDM	<i>Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i> – kodowana modulacja OFDM	OFDMA	<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i> – wielodostęp OFDM
CSS	<i>Chirp Spread Spectrum</i> – widmo rozproszone typu chirp	P2P	<i>Point-to-Point</i> – topologia punkt-punkt
DM	<i>Deformable Mirror</i> – zwierciadło odkształcalne	PIN	<i>P-type-Intrinsic-N-type</i> – typ fotodiody
DSSS	<i>Direct Sequence Spread Spectrum</i> – widmo rozproszone z sekwencją bezpośrednią	PN	<i>Pseudo-Noise</i> – kody pseudolosowe
EW	<i>Electronic Warfare</i> – walka radioelektroniczna	PVDF	<i>Polyvinylidene Fluoride</i> – cienkowarstwowy polimer piezoelektryczny
FHSS	<i>Frequency Hopping Spread Spectrum</i> – widmo rozproszone z przeskokami częstotliwości	PZT	<i>Lead Zirconate Titanate</i> – ceramika piezoelektryczna
FPV	<i>First Person View</i> – obraz z perspektywy operatora	QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i> – kwadraturowa modulacja amplitudy
FSO	<i>Free-Space Optics</i> – transmisja optyczna w wolnej przestrzeni	RF	<i>Radio Frequency</i> – układy radiowe
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i> – globalne systemy nawigacji satelitarnej	SAASM	<i>Selective Availability Anti-Spoofing Module</i> – moduł zabezpieczeń GPS
GPS	<i>Global Positioning System</i> – amerykański system pozycjonowania satelitarnego	SDR	<i>Software Defined Radio</i> – radio definiowane programowo
HF	<i>High Frequency</i> – pasmo wysokich częstotliwości (3–30 MHz)	SFO	<i>Spoiled Fiber Optics</i> – światłowód rozwijany w locie
ISM	<i>Industrial, Scientific and Medical</i> – pasma przemysłowe, naukowe i medyczne	SS	<i>Spread Spectrum</i> – widmo rozproszone
LEO	<i>Low Earth Orbit</i> – niska orbita okołozemska	TDI	<i>Time Domain Interleaving</i> – przeplot wysyłanych symboli w dziedzinie czasu
LFSR	<i>Linear Feedback Shift Register</i> – rejestr przesuwany ze sprzężeniem zwrotnym	TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i> – wielodostęp z podziałem czasowym
LoRa	<i>Long Range</i> – standard komunikacji radiowej o dużym zasięgu	TFO	<i>Tethered Fiber Optics</i> – BSP na uwięzi światłowodowej
		UAV	<i>Unmanned Aerial Vehicle</i> – bezzałogowy statek powietrzny
		UHF	<i>Ultra High Frequency</i> – pasmo 300 MHz – 3 GHz
		VLOS	<i>Visual Line of Sight</i> – operacje w zasięgu widoczności wzrokowej

Kontroli (NSK), gdzie operator podejmuje decyzje, a sygnały sterujące są odsyłane do BSP.

W trybie autonomicznym BSP korzysta z pokładowych algorytmów do realizacji zadań takich jak nawigacja, unikanie kolizji, rozpoznawanie celów czy identyfikacja obiektów (np. klasyfikacja swój/obcy). Mimo szybkiego rozwoju technologii autonomii, wiele wyzwań takich jak niezawodność algorytmów w zmiennych warunkach, ograniczenia percepcji otoczenia czy zagrożenia związane z cyberbezpieczeństwem – sprawia, że większość współczesnych BSP nadal działa w trybie zdalnie sterowanym, z aktywnym udziałem pilota.

Oprócz systemów całkowicie autonomicznych i w pełni pilotowanych istnieją także rozwiązania pośrednie, w których BSP wykonuje większość zadań samodzielnie, natomiast człowiek interweniuje jedynie w sytuacjach krytycznych lub przy podejmowaniu decyzji strategicznych.

Istnieje wiele możliwych klasyfikacji BSP – m.in. według poziomu autonomii, przeznaczenia, typu napędu czy zasięgu operacyjnego [3]. Niezależnie jednak od przyjętej typologii, elementem wspólnym dla większości systemów BSP pozostaje łączność – stanowi ona kluczowy składnik architektury systemu i nie może być całkowicie wyeliminowana, nawet w najbardziej zaawansowanych rozwiązaniach autonomicznych.

2. Łączność radiowa BSP

Aktualnie można wyszczególnić cztery podstawowe kanały komunikacji z BSP, które przedstawiono w tabeli 1. Do sterowania lotem zazwyczaj wystarcza przepustowość kilkunastu kbps, natomiast do NSK przekazywane są dane telemetryczne. W niektórych przypadkach, np. w BSP kamikadze, zamiast danych telemetrycznych wystarczający jest tylko obraz z kamery dla pilota wysyłającego tylko sygnał sterowania. Przesyłanie obrazów wymaga znacznie szerszego pasma przepustowego. Z tego powodu zakresy częstotliwości kanałów wideo są zazwyczaj wyższe od kanałów sterowania i telemetrii. Często wykorzystuje się dwa zakresy radiowe oddzielnie dla sterowania i wideo. Przesyłanie surowego obrazu wideo możliwe jest jedynie dla małych rozdzielczości i sygnałów analogowych jednak najczęściej dla obrazów o większej rozdzielczości obraz jest kompresowany co nieodłącznie wiąże się z dodatkowym czasem potrzebnym na kompresję w BSP i dekompresję w NSK.

2.1. Łączność bezpośrednia i topologia kratowa

Łączność bezpośrednia P2P (punkt - punkt) pomiędzy NSK i BSP jest obecnie najczęściej stosowanym sposobem komunikacji radiowej w BSP klasy MINI. Każdą łączność radiową

Tabela 1. Podział łączności radiowej BSP według funkcji i cech technicznych
Table 1. Classification of UAV radio communications by function and technical characteristics

Typ łączności	Funkcja	Pasma	Przepustowość
Command & Control	Kontrola BSP	HF/UHF/ISM	~1–20 kbps
Telemetria	Dane z BSP	UHF/ISM	~1–20 kbps
Wideo (FPV)	Obrazy z kamer	ISM, LTE	~1–20 Mbps
Łączność awaryjna	Komendy awaryjne, np. lokalizator, autodestrukcja	HF/UHF	~1 kbps

źródło: opracowanie własne

charakteryzują ograniczenia narzucone przez właściwość uzależnione od częstotliwości połączenia radiowego. Optymalne bezpośrednie połączenie BSP z NSK wymaga nie tylko bezpośredniej widoczności optycznej, ale również zachowanie odpowiedniego „oczyszczenia” pierwszej strefy Fresnela (zwykle minimum 60 % jej promienia). Obecność drzew, budynków czy ukształtowanie terenu, może powodować odbicia lub zawężanie w strefie, co obniża lub całkowicie uniemożliwia transmisję. Dla niższych częstotliwości (np. 900 MHz) strefa Fresnela jest znacznie szersza, ale sygnał lepiej penetruje przeszkody i ma większy zasięg. Najmniej podatne na przeszkody jest zakres HF, który stosowany jest na dalekie zasięgi w kanałach sterowania, kontroli i telemetrii. Pierwszą strefę Fresnela można wyznaczyć wzorem (1) [4].

$$F_1 = \sqrt{\frac{\lambda \cdot d_1 \cdot d_2}{d_1 + d_2}}$$

(1)

gdzie: F_1 – promień pierwszej strefy Fresnela [m], λ – długość fali [m], d_1 , d_2 – odległości od punktu przeszkody do nadajnika i odbiornika [m].

Tłumienie sygnału szczegółowo opisano w [46] i jest wyrażone wzorem (2).

$$L = 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) + 32,44$$

(2)

gdzie: L – tłumienie sygnału [dB], d – odległość pomiędzy antenami [km], f – częstotliwość sygnału [MHz].

Współczesne systemy łączności oferują zaawansowane funkcje retransmisji sygnałów, zwiększając zasięg i niezawodność transmisji danych w środowiskach o ograniczonej widoczności bezpośredniej. Jednym z popularnych podejść jest architektura typu *Mesh* lub *Relay*, w której bezałogowe statki powietrzne mogą pełnić rolę węzłów pośredniczących, przekazujących sygnał pomiędzy innymi platformami lub stacjami naziemnymi, co umożliwia tworzenie elastycznych i samonaprawiających się sieci transmisyjnych. Zastosowanie technologii MIMO (ang. *Multiple Input Multiple Output*) pozwala na równoczesną transmisję wielu strumieni danych w różnych polaryzacjach, co znacząco zwiększa przepustowość i odporność systemu na zakłócenia [5]. Kluczowe znaczenie ma również dobór odpowiednich charakterystyk anten. BSP zazwyczaj wyposażane są w anteny dookólne, umożliwiające odbiór sygnału niezależnie od orientacji statku, choć i tu są również rozwiązania stosowania anten kierunkowych [6]. W stacjach naziemnych powszechnie stosuje się anteny kierunkowe, zapewniające wąską wiązkę o dużym zysku energetycznym i wyższej odporności na zakłócenia. Taka konfiguracja umożliwia pogodzenie wymagań mobilności i elastyczności BSP z wydajnością i precyzją stacjonarnych systemów naziemnych.

Do zastosowań militarnych nierzadko pozyskiwane są również cywilne systemy FPV *View* (ang. *First Person*) pracujące w pasmach ISM (np. 2,4 GHz, 5,8 GHz) z zastosowaniem FHSS (ang. *Frequency Hopping Spread Spectrum*) lub DSSS (ang. *Direct Sequence Spread Spectrum*). W tabeli 2 przedstawiono listę popularnych modułów radiowych z podziałem na techniki transmisyjne.

2.2. Łączność z rozproszonym widmem

Systemy z rozproszonym widmem SS (ang. *Spread Spectrum*) swoją historią sięgają patentu z 1903 r., w którym Nicola Tesla zaproponował łączność odporną na zakłócenia przez szybką zmianę częstotliwości [7]. Idea oparta jest na synchronicznym przestrajaniu nadajnika i odbiornika w taki sam sposób. W BSP technikę SS stosuje się w transmisji telemetrycznej oraz wideo, szczególnie tam, gdzie istnieje ryzyko zakłóceń radiowych lub prób przechwycenia łącza. Rozproszone widmo pozostaje obecnie jednym z fundamentów bezpiecznej i niezawodnej łączności w nowoczesnych BSP. Dzięki niskiej gęstości mocy i dużemu zasięgowi komunikacja SS doskonale sprawdza się w BSP dalekiego zasięgu, nawet w trudnych warunkach elektromagnetycznych.

Obecnie można wyszczególnić dwa sposoby rozpraszania: rozpraszanie widma za pomocą przeskoków częstotliwości FHSS (ang. *Frequency Hopping Spread Spectrum*) według określonego wzorca rozciągającego widmo za pomocą sekwencji rozpraszającej [8]. Drugim sposobem jest DSSS (ang. *Direct Sequence Spread Spectrum*) gdzie sygnał jest mnożony przez pseudolosowy kod, rozciągający transmisję na szerokie pasmo częstotliwości [9, 10].

Najczęściej stosowane mechanizmy rozpraszania w DSSS obejmują: kody pseudolosowe PN (ang. *Pseudo-Noise*) generowane przez rejestry przesuwne z sprzężeniem zwrotnym LFSR (ang. *Linear Feedback Shift Register*), pseudolosowe kody Golda oraz macierze ortogonalne. Poniżej przedstawiono przykład ilustrujący działanie mechanizmu rozpraszania z wykorzystaniem macierzy Hadamarda rzędu 4 (dla czterech użytkowników i czterech podzakresów częstotliwości), w którym każdemu użytkownikowi przypisany jest unikalny kod ortogonalny (wybrany wiersz macierzy), jak pokazano w równaniu (3).

$$H_4 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix}$$

Sender	f_1	f_2	f_3	f_4
A	1	1	1	1
B	1	-1	1	-1
C	1	1	-1	-1
D	1	-1	-1	1

(3)

Każdemu użytkownikowi przypisywany jest jeden z wierszy macierzy jako jego indywidualny kod rozpraszający. Zakładając, że czterech użytkowników (A , B , C , D) jednocześnie przesyła następujące bity: $A = 1$, $B = 1$, $C = -1$, $D = -1$, odpowiadające im kody to odpowiednio wartości wierszy od pierwszego do czwartego. Proces kodowania polega na przemnożeniu bitu przez kod przypisany do danego użytkownika (wiersz macierzy). Przykład takiej operacji dla nadajnika D przedstawiono w równaniu (4).

$$D = -1 \cdot [1, -1, -1, 1] = [-1, 1, 1, -1]$$

(4)

Ponieważ każdy wiersz odpowiada wycinkowi częstotliwości o szerokości 1/4 całkowitej szerokości pasma transmisji, sygnał odbierany stanowi sumę wszystkich sygnałów transmitowanych przez użytkowników. Suma ta została wyrażona w równaniu (5).

$$S = [1, 1, 1, 1] + [1, -1, -1, 1] + [-1, -1, 1, 1] + [-1, 1, 1, -1] = [0, 0, 4, 0]$$

(5)

Odbiornik dekoduje swoją wiadomość, wykonując korelację (iloczyn skalarny) odebranego sygnału z własnym kodem, podzieloną przez długość kodu, jak pokazano w równaniu (6).

$$D : \frac{1}{4}(0 - 0 - 4 + 0) = -1$$

(6)

Każdy odbiornik odczytuje swój bit, mimo że wszyscy nadawali jednocześnie, co możliwe jest dzięki ortogonalności kodów Hadamarda. W tym przypadku DSSS umożliwia jednoczesny dostęp CDMA (ang. *Code Division Multiple Access*) przez wszystkich użytkowników w tym samym czasie bez szkody dla sygnału, jednak ich ilość oraz liczba przedziałów częstotliwości determinowana jest rzędem macierzy H . Ponadto aby prawidłowo odczytać przesyłany bit, nadajnik i odbiornik muszą być zsynchronizowane na poziomie czasu trwania pojedynczego bitu. Proces ten składa się z etapów akwizycji oraz śledzenia. Synchronizacja może nastąpić po wykryciu korelacji z sekwencją preambuły wysyłanego ciągu znaków, wykryciu maksymalnej energii porównywanej sekwencji lub dokładnym wykryciu nadejścia impulsu. Istnieje również rzadziej stosowana metoda (ang. *Open-loop synchronization*) oparta na lokalnych atomowych lub rubidowych wzorcach czasu oraz z góry ustalonych sekwencja pseudolosowych [11]. Szybka synchronizacja nadajnika i odbiornika umożliwia zwiększenie częstotliwości przeskoków. Im wyższa prędkość przeskoku częstotliwości, tym mniejsze prawdopodobieństwo przechwycenia sygnału [12]. Jednak ten sposób wymaga uwzględniania opóźnień propagacji

Tabela 2. Przykładowe moduły radiowe stosowane w BSP
Table 2. Examples of radio modules used in UAVs

System/Moduł	Technika transmisji	Częstotliwość	Przepustowość
TBS Crossfire	LoRa (CSS)	868/915 MHz	85 kbps
ExpressLRS	LoRa/FLRC	433/868/915/2400 MHz	4-8 kbps
FrSky ACCST/ACCESS	FHSS	868/2400 MHz	do 10 kbps
DJI Digital FPV	OFDMA + TDMA	5,8 GHz	
SiK Radio (3DR, RFD900)	FHSS	433/868/915 MHz	250 kbps
DragonLink	FHSS	433 MHz	18-20 kbps
Microhard pDDL	TDMA	900 MHz	do 28 Mbps
LoRa (np. RFM95W)	CSS	868 MHz	
Radiolink AT9S/T8FB	FHSS (67 kanałów)/DSSS	2,4 GHz	38/250 kbps
Spektrum DSMX	FHSS	2,4 GHz	22 kbps
OpenHD (Wi-Fi)	OFDMA/Wi-Fi (TDMA via software)	2,4/5,8 GHz	do 15 Mbps
DoodleLabs	MIMO, MESH	255/450/900/1300-1625/ 2200-2500/4400-5800 MHz	80 Mbps
Domo Tactical Communications (DTC)	COFDM, MIMO, MESH	320-470/902-928/1140-1500/ 1670-2350/1980-2700/4400-5000 MHz	48 Mbps
Silvus	QAM, MIMO	400-450/663-698/802-928/ 135-1492/ 179-1850/2025-2500/ 4400-5875 MHz	100 Mbps
SKYTRAC (Iridium) – satelitarne	TDMA + FDMA (41,67 kHz)	1616-1626,5 MHz	22 kbps uplink/ 88 kbps downlink
Globalstar – satelitarne	b.d.	1610,73-1620,57 MHz uplink, 2484,39-2499,15 MHz downlink	9600 bsp
Starlink – satelitarne	OFDM	10,7-12,7 GHz downlink/14,0-14,5 GHz uplink (dla terminali)	220 Mbps downlink/ 25 Mbps uplink

źródło: opracowanie własne

fali radiowej między nadajnikiem i odbiornikiem. Choć niewątpliwą zaletą DSSS jest możliwość ukrywania widma sygnału poniżej poziomu szumu, opisane ograniczenia powodują, że w zastosowaniach militarnych metoda FHSS z synchronizacją korelacyjną jest częściej stosowana, gdyż jej implementacja nie wymaga wysokiej precyzji pomiaru czasu i skomplikowanej budowy.

Mimo niezaprzeczalnych zalet, technikę SS charakteryzują specyficzne wymagania, które związane są ze stosowaniem znacznie szerszego pasma elektromagnetycznego niż przesyłany sygnał. Układy wzmacniaczy, filtrów oraz anten muszą pracować w szerokim zakresie przez co ich sprawność może być mniejsza. Urządzenie odbiorcze musi posiadać mechanizm precyzyjnej synchronizacji przeskoków lub rozpraszania co wiąże się ze skomplikowaną budową. Sekwencja kodująca odbywa się zazwyczaj na podstawie poufnego klucza, który trzeba dystrybuować między uprawnionymi urządzeniami.

2.3. Radio kognitywne

W aspekcie walki radioelektronicznej nowoczesne moduły radiowe projektowane są do działania kognitywnego. Radio kognitywne umożliwia dynamiczne dostosowanie parametrów łącza w zależności od warunków otoczenia, takich jak zakłócenia czy przeszkody terenowe [13]. Dzięki analizie widma i adaptacji częstotliwości [14] i mocy nadajnika [15], radio kognitywne zwiększa niezawodność i odporność łączności BSP na przeciwdziałanie elektroniczne. Umożliwia także bardziej efektywne wykorzystanie dostępnych pasm, co jest szczególnie istotne w środowisku o ograniczonym i przeciążonym widmie radiowym.

2.4. Łączność satelitarna

Dominującym rozwiązaniem jest obecnie Starlink. Terminale tego systemu pracują w paśmie Ku, wykorzystując częstotliwości 10,7–12,7 GHz, uplink 14,0–14,5 GHz. Zaletą rozwiązania jest brak konieczności precyzyjnego kierowania anteny w stronę satelity, dzięki zastosowaniu technologii formowania wiązki za pomocą przesuwników fazowych (ang. *beamforming*). Producent oferuje różne warianty terminali – od wersji stacjonarnych po wysokowydajne rozwiązania mobilne. System charakteryzuje się odpornością na zakłócenia elektromagnetyczne, choć transmisja może ulegać znacznemu tłumieniu w warunkach silnych opadów deszczu lub śniegu.

Drugie pasmo Ku wykorzystywane jest przez satelity do komunikacji z naziemnymi stacjami brzegowymi, odpowiednio na częstotliwościach – downlink: 17,8–18,6 GHz lub 18,8–19,3 GHz, uplink: 27,5–29,1 GHz oraz 29,5–30,0 GHz. Sygnały zarówno terminala użytkownika, jak i stacji brzegowej mogą być wykrywane za pomocą radia definiowanego programowo SDR (ang. *Software Defined Radio*) oraz odpowiednio dostrojonej parabolicznej anteny kierunkowej.

W zastosowaniach wojskowych system Starlink rzadziej znajduje się bezpośrednio na pokładzie BSP. Znacznie częściej pełni rolę pośredniego ogniwa komunikacyjnego między NSK a ośrodkami dowodzenia, zapewniając kanał do przesyłu danych wywiadowczych. Przykładem praktycznego wykorzystania może być ukraiński system oznaczania celów „Pokrzywa” (ukr. *Krapiva*), w którym komunikacja z bazą danych odbywa się za pośrednictwem łącza satelitarnego, natomiast przesył danych z czujników i dronów realizowany jest w topologii P2P.

Terminale Starlink pracujące w warunkach mobilnych wykazują większy poziom utraty danych w porównaniu z instalacjami stacjonarnymi. Problem ten został szerzej omówiony w [16]. Zgodnie z danymi zawartymi w [17, 18], typowa przepustowość dla systemu Starlink wynosi do 220 Mbit/s downlink oraz do 25 Mbit/s uplink, przy opóźnieniu rzędu 25–60 ms.

Istnieją również alternatywne rozwiązania komunikacji satelitarnej, takie jak OneWeb, Inmarsat Global Xpress, SES O3b

mPOWER czy ViaSat-3. Systemy te są jednak skierowane głównie do klientów instytucjonalnych, operatorów telekomunikacyjnych oraz sektora rządowego. Terminale są zwykle dostępne poprzez autoryzowanych integratorów, a koszty sprzętu i usług są wysokie. Co więcej, nie wszystkie z tych systemów obejmują globalny zasięg lub dostępność w Europie Środkowej.

W kontekście lekkich, kompaktowych terminali o wysokiej niezawodności dużą rolę odgrywa system Iridium Certus. Pracuje on w paśmie L (1–2 GHz) i jest dostępny globalnie, nawet w rejonach polarnych. Przepustowość w wersji Certus 700 wynosi do 704 kb/s (downlink) oraz 352 kb/s (uplink), przy typowej latencji rzędu 350–450 ms [47, 48]. Zaletą systemu jest bardzo wysoka odporność na warunki atmosferyczne i możliwość korzystania z niewielkich anten. Ograniczeniem pozostaje niska przepustowość, która czyni Iridium bardziej odpowiednim do przesyłu danych telemetrycznych, krótkich wiadomości i zastosowań krytycznych, niż do transmisji obrazu.

2.5. Zakłócenia łączności radiowej

Łączność w topologii sieci oraz z rozproszonym widmem zostały zaprojektowane z myślą o odporności na zakłócenia. Podsluch i przechwycenie informacji jest trudne w realizacji, to jednak jest podatny na ataki. Wiele aspektów związanych z „black flight” opisano w [19]. Poniżej przedstawiono najważniejsze typy ataków, które mogą być skierowane przeciwko takim systemom w kontekście militarnym:

1. Biały szum szerokopasmowy (ang. *jamming*). Jeśli moc szumu jest większa niż moc sygnału użytkowego odbiornik „nie widzi” sygnału (zanika SNR – stosunek sygnału do szumu) [20]. W BSP typu kamikadze obecność nadajnika o mocy kilku watów w odległości 200 m może uniemożliwić sterowanie w końcowej fazie lotu. Montowanie nadajników szumu białego w pojazdach opancerzanych obecnie stało się ogólną praktyką;
2. Zakłócenie pasmowe (ang. *narrowband jamming*). Atak polega na zagłuszeniu wybranej częstotliwości np. falą nośną, szumem lub sygnałem pseudolosowym. W celu przeciwdziałania stosowane są różne techniki radia kognitywnego jak np. przeplot w dziedzinie czasu TDI (ang. *Time Domain Interleaving*) [21];
3. Jamming synchronizacyjny – atak wymierzony w moment synchronizacji kodu DSSS lub sekwencji skoków FHSS. Celem tego ataku nie jest ogólne zagłuszenie całego sygnału, lecz uniemożliwienie lub utrudnienie nawiązania lub utrzymania synchronizacji, co w praktyce oznacza przerwanie komunikacji. Można wyróżnić kilka rodzajów tego ataku: przerywanie ramek, zagłuszanie sygnału synchronizacyjnego lub wysyłanie fałszywego sygnału synchronizacyjnego [22];
4. Atak sygnałem imitującym (ang. *spoofing*) – technika polegająca na fałszowaniu tożsamości w celu uzyskania dostępu, wprowadzenia w błąd lub przejęcia komunikacji. Istnieje wiele rodzajów tego typu ataku. Częstym przypadkiem jest imitowanie fałszywego sygnału GNSS, co prowadzi do zmiany rzeczywistej pozycji BSP względem pozycji zamierzonej. Mechanizmy obronne polegają na równoległym stosowaniu niezależnych układów pomiaru inercyjnego oraz zabezpieczonej przed spoofingiem komunikacji GPS za pomocą wyspecjalizowanych wojskowych modułów SAASM (ang. *Selective Availability Anti-Spoofing Module*), które wprawdzie nie zabezpieczają przed utratą sygnału GPS ale skutecznie wykrywają próby przejęcia [23];
5. Desynchronizacja – atakujący generuje krótkie impulsy RF w losowych momentach, które mylą odbiornik BSP i zrywają łącze. W odróżnieniu od jammingu synchronizacyjnego, desynchronizacja działa na wyższych warstwach protokołów. Zazwyczaj działa na zasadzie wstrzykiwania

falszywych pakietów TCP z fałszywym numerem co skutkuje zerwaniem sesji i wymusza ponowną synchronizację na poziomie warstwy transportowej;

2.6. Wykrywanie i identyfikacja sygnatury radiowej BSP

Dzięki zastosowaniu układów SDR analiza sygnałów radiowych stała się prosta w realizacji i umożliwia ostrzeżenie o zbliżającym się zagrożeniu ze strony wroga. Do niedawna, do analizy sygnałów potrzebne były kosztowne analizatory widmowe. Obecnie prosty zestaw obserwacji widma radiowego można w łatwy sposób wykonać za pomocą tanich modułów SDR, takich jak HackRF. Przykład takiego zestawu przedstawiono na rysunku 1. Zestaw składa się z radia SDR HackRF, przedwzmacniacza antenowego, anteny oraz laptopa z oprogramowaniem. Taki zestaw umożliwia wykrycie obecności BSP z odległości około 2 km. Antena nie powinna być zamontowana wysoko, aby nie zbierać dalekich sygnałów.

Na rysunku 2 przedstawiono dwa przechwycone sygnały radiowe za pomocą SDR. Sygnały należą do stosowanych



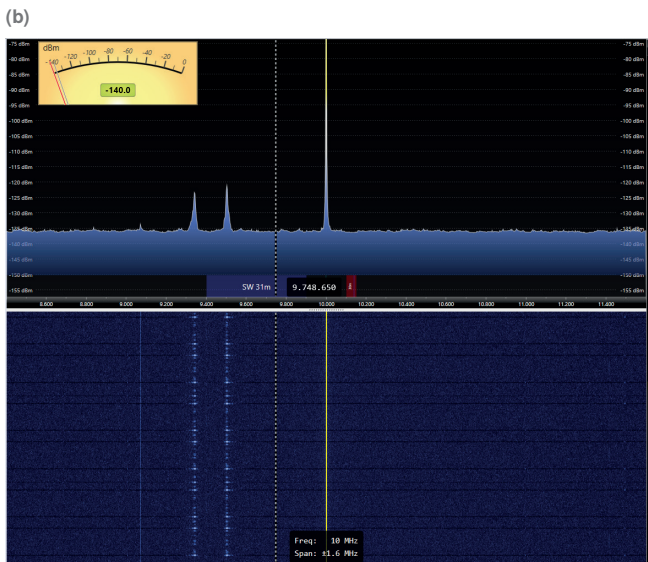
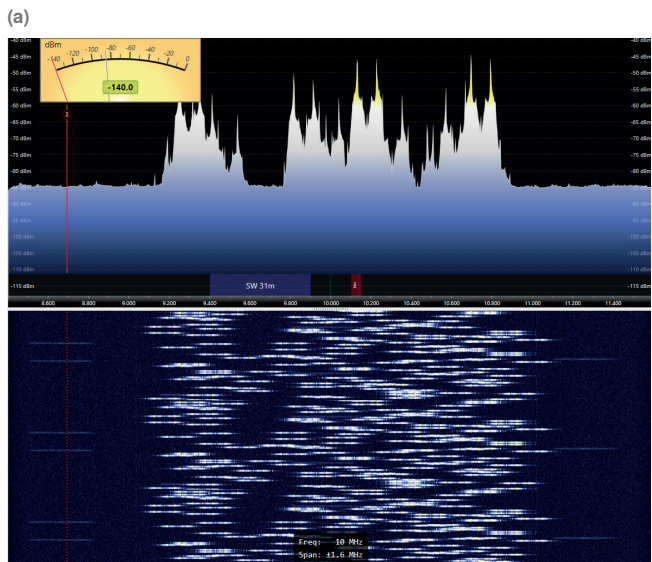
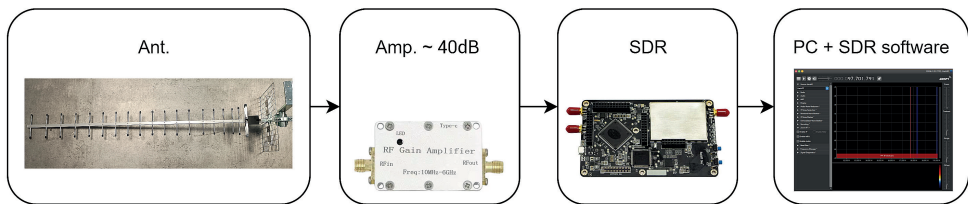
Rys. 3. Osobisty odbiornik SDR Obriy 1.3 do wykrywania BSP

Fig. 3. Obriy 1.3 Personal SDR Receiver for UAV Detection

(źródło: <https://karadagtech.com>)

Rys. 1. Przykładowa konfiguracja prostego systemu wykrywania BSP

Fig. 1. Example configuration of a simple UAV detection system



Rys. 2. Wykresy kaskadowe sygnatury RF w zakresie HF BSP: (a) ORLAN, (b) ZALA BSP (źródło: sygnatury udostępnione dzięki uprzejmości firmy KARA DAG – Ukraina)

Fig. 2. Cascade diagrams of RF signatures in the HF range of UAVs: (a) ORLAN, (b) ZALA UAVs

na froncie ukraińskim BSP Zala i BSP Orlan. W praktyce, wprawne oko operatora umożliwia szybkie rozpoznanie zagrożenia na podstawie wykresu wodospadowego a odbiór sygnałów z rozproszonych odbiorników SDR połączonych sieciowo, umożliwia określenie kierunku lotu na podstawie mocy odbieranych sygnałów.

Obecnie układy analizy radiowej, podobnie jak same BSP stały się osobistym wyposażeniem żołnierza na współczesnym polu walki. Na rysunku 3 przedstawiono kieszonkowy personalny odbiornik SDR Obriy 1.3. Urządzenie jest proste i kompaktowe, zdolne do informowania o zbliżającym się BSP na

podstawie sygnatury radiowej z odległości około 2 km. Konstruktorzy zapewnili minimum fałszywych alarmów pochodzących od innych nieszkodliwych urządzeń znajdujących się w pobliżu a samo urządzenie jest czułe na określony zestaw często stosowanych przez wroga BSP.

Metody identyfikacji na podstawie sygnatury opisano w [24]. Do automatycznej identyfikacji znakomicie nadają się układy zbudowane w oparciu o spłotowe sieci neuronowe CNN [25], w których analizowane są nie tyle widma chwilowe zajmowanego pasma, co trójwymiarowe obrazy transmisji (w przestrzeni: częstotliwość, moc, czas).

3. Łączność optyczna

Aktualnie istnieją kilka sposobów komunikacji optycznej łączące NSK i BSP, przy czym wszystkie wykorzystują promieniowanie podczerwone:

- 1. Komunikacja światłowodowa na małą odległość TFO (ang. *Tethered Fiber Optics*) – BSP na uwięzi;
- 2. Komunikacja światłowodowa na dużą odległość SFO (ang. *Spoiled Fiber Optics*);
- 3. Komunikacja w otwartej przestrzeni FSO (ang. *Free-Space Optics*).

Rozwój i wdrożenie tych technologii może okazać się kluczowy dla utrzymania przewagi informacyjnej na polu walki, szczególnie w obliczu rosnących zagrożeń dla łączności radiowej. W tabeli 3 przedstawiono najważniejsze cechy opisanych rodzajów łączności optycznej.

3.1. Tethered Fiber Optics

Komunikacja światłowodowa na małą odległość, to metoda komunikacji wykorzystywana w niektórych BSP, szczególnie w zastosowaniach wymagających dużej niezawodności, długotrwałości lotu, wysokiego bezpieczeństwa transmisji i odporności na zakłócenia. W tego typu rozwiązaniach BSP jest fizycznie połączony ze stacją naziemną za pomocą cienkiego i lekkiego kabla światłowodowego. Tether (uwięź) zapewnia dwukierunkową komunikację w czasie rzeczywistym – zarówno transmisję danych sterujących do BSP, oraz przesyłanie danych telemetrycznych i wideo do operatora [26]. Zaletą tego podejścia jest bardzo wysoka przepustowość i odporność na zakłócenia elektromagnetyczne, co czyni tę technologię idealną do pracy w środowiskach o silnym natężeniu fal radiowych albo tam, gdzie nie można stosować standardowej łączności bezprzewodowej, np. ze względów bezpieczeństwa. Ponadto światłowód zapewnia bardzo niski poziom opóźnień, co ma znaczenie w zadaniach wymagających precyzyjnego sterowania lub natychmiastowej reakcji operatora. Tether służy również jako źródło zasilania – są to zazwyczaj światłowody hybrydowe, w których światłowód jest zintegrowany z przewodem zasilającym, co pozwala na nieograniczone wydłużenie czasu operacyjnego BSP.

Ciekawe rozwiązanie zaproponowano w [27], gdzie energia nie jest przesyłana galwanicznie lecz za pomocą tego samego światłowodu. W omawianym przypadku zastosowano światłowód MMF o długości 500 m. Źródłem energii dla BSP jest laser o długości fali 808 nm zamontowany w stacji naziemnej o max. mocy 400 W. Światło lasera jest konwertowane po stronie BSP na energię elektryczną za pomocą komórek fotoelektrycznych co zapewnia nieprzerwaną pracę.

Ograniczeniem TFO jest zasięg, który zazwyczaj wynosi od kilkudziesięciu do kilkuset metrów w zależności od długości

i wytrzymałości przewodu. Mimo tego ograniczenia TFO sprawdza się znakomicie w zadaniach punktowych, takich jak monitoring z powietrza, działania służb ratowniczych, obserwacja imprez masowych czy zabezpieczenie infrastruktury krytycznej, gdzie BSP pełni funkcję tymczasowego punktu obserwacyjnego i nie musi się przemieszczać na duże odległości. Może również pełnić funkcję wysokiego masztu radiowego (wyniesione anteny radiowej) dla komunikacji radiowej dalekiego zasięgu [28].

3.2. Spoiled Fiber Optics

Komunikacja SFO działa na zasadzie rozwijanego światłowodu odpowiednio nawiniętego na szpuli znajdującej się na pokładzie BSP. Koncepcja SFO była już stosowana w amunicji kierowanej, jednak w odniesieniu do BSP jest stosunkowo nowym podejściem. W dziedzinie tego nowego zastosowania ujawnionego w konflikcie na Ukrainie istnieje luka w literaturze. Potwierdzeniem tego faktu może być całkowity brak informacji na ten temat w przeglądzie metod komunikacyjnych BSP z 2021 r. [29]. W SFO stosuje się światłowód jednomodowy, który rozwija się automatycznie w trakcie lotu. Tego typu rozwiązanie pozwala na znacznie większy zasięg niż klasyczny tether, ponieważ BSP samodzielnie „wypuszcza” światłowód w miarę oddalania się od punktu startowego jest to rozwiązanie jednorazowego użytku. Komunikacja odbywa się z wysoką przepustowością i zapewnia znikomą latencję sygnału oraz pełną odporność na zakłócenia elektromagnetyczne. Ponieważ technologia ta umożliwia wyjątkowo bezpieczne przesyłanie danych wrażliwych, czyni ją atrakcyjną dla zastosowań militarnych, wywiadowczych oraz dywersyjnych. Dodatkowym atutem jest możliwość prowadzenia lotu poza zasięgiem wzroku. Na rysunku 4 przedstawiono przykładowy komercyjny zasobnik ze szpulą światłowodu o masie 1825 g i włóknem o długości 20 km.

Zaletą SFO jest możliwość poruszania się BSP w większym promieniu działania niż w systemie na uwięzi. SFO nie ma określonej sygnatury radiowej i obecnie nie ma informacji w literaturze na temat metody przechwycenia sygnału. Istotnym



Rys. 4. Zasobnik ze światłowodem podwieszanym pod BSP
Fig. 4. Container with optical fiber suspended under the UAV

Tabela 3. Porównanie sposobów komunikacji optycznej BSP
Table 3. Comparison of UAV Optical Communication Methods

Cecha	Spoiled Fiber Optics	Tethered Fiber Optics	Free-Space Optics
Typ połączenia	Światłowód rozwijany w locie	Połączenie stałe uwięziowe	W wolnej przestrzeni VLOS
Zasięg	Zależny od długości szpuli (kilkadziesiąt km)	Ograniczony do długości kabla (zwykle <1 km)	Łączność ostatniej mili
Czas operacji	Ograniczony przez długość kabla i energię/paliwo BSP	Nieograniczony (ciągłe zasilanie)	Ograniczony przez energię BSP
Bezpieczeństwo	Bardzo wysoka odporność na zakłócenia	Bardzo wysoka odporność na zakłócenia	Niska odporność na warunki atmosferyczne
Zastosowanie	Misje zwiadowcze, wojskowe, badawcze	Stale stanowiska obserwacyjne, telekomunikacja	–

źródło: opracowanie własne

ograniczeniem SFO jest długość światłowodu determinującego zasięg misji. Delikatne włókno rozwijanego światłowodu wymaga odpowiedniego planowania trajektorii lotu, aby uniknąć jego splątania lub zahaczenia o przeszkody. Często wybieranym do tego celu światłowodem jest włókno G657.a2 o średnicy 0,25 mm. Jego charakterystyka sprawia, że charakteryzuje się najmniejszym tłumieniem poniżej 0,3 dB/km w zakresie 1530–1565 nm (trzecie okno transmisyjne.) Dzięki temu BSP mogą pokonać dystans kilkudziesięciu kilometrów bez regeneracji sygnału. Problemem jest natomiast masa tak dużego zasobnika. W wyniku przedstawionych ograniczeń, SFO stosuje się głównie w misjach specjalnych, gdzie priorytetem jest bezpieczeństwo transmisji i niezawodność łączności, a nie pełna swoboda lotu. Mimo licznych wad, jak choćby jednorazowe użycie światłowodu, rozwiązanie to ma na tyle istotne zalety (brak możliwości podsłuchu, duży i niczym niezakłócony transfer danych oraz działanie poza granicami horyzontów radiowych), że coraz częściej jest stosowane. Co więcej duża przepustowość danych sprawia, że przesyłany strumień wideo nie musi być kompresowany, co korzystnie wpływa na obniżenie kosztów i poboru energii.

3.3. Free-Space Optics

W ostatnich latach, badania nad komunikacją optyczną FSO stanowią jedną z najbardziej dynamicznie rozwijających się dziedzin telekomunikacji. Klasyfikację systemów FSO przedstawiono m.in. w [30]. Technologia ta opiera się na bezprzewodowej transmisji danych przy użyciu światła (najczęściej laserowego) i wymaga bezpośredniej widoczności optycznej między nadajnikiem a odbiornikiem LoS (ang. *Line of Sight*).

W komunikacji między NSK i BSP wykorzystuje się precyzyjne głowice śledzące [31], które operują na bardzo wąskich wiązkach światła – typowy kąt rozbieżności wynosi nie więcej niż kilka miliradianów. Alternatywnym podejściem jest zastosowanie rozwiązań opartych na dookólnym rozpraszaniu światła emitowanego wokół BSP [32], co pozwala na odbiór sygnału z dowolnego kąta względem platformy. Takie rozpraszacze mogą przyjmować postać zwisających anten emitujących światło we wszystkich kierunkach.

Równolegle prowadzone są intensywne prace nad lekkimi terminalami laserowymi dla satelitów LEO oraz BSP, cechującymi się małymi gabarytami, niskim zużyciem energii i wysoką przepustowością. Systemy te mają umożliwiać zarówno komunikację satelita-satelita, jak i bezpośredni przesył danych do terminali naziemnych [33]. Teoretycznie parametry zakładają zasięg do 4000 km i przepustowość rzędu 10 Gb/s. Efektywne działanie tego typu systemów wymaga jednak precyzyjnego śledzenia i naprowadzania wiązki ATP (ang. *Acquisition, Pointing and Tracking*). Stratosferyczne eksperymenty potwierdziły funkcjonowanie terminali laserowych na dystansie do 144 km [34].

Mimo znacznego potencjału technologii FSO, jej zastosowania w sektorze BSP znajdują się nadal na etapie badań i prototypów. Dotychczas nie powstały komercyjne, zmminiaturyzowane systemy FSO powszechnie stosowane w BSP, co wynika m.in. z trudności w precyzyjnym naprowadzaniu wiązki w warunkach dynamicznego ruchu BSP, podatności na zakłó-

cenia atmosferyczne oraz wysokich wymagań co do precyzji i stabilizacji. Większość dotychczasowych rozwiązań koncentruje się na testach w środowiskach stratosferycznych, misjach balonowych lub komunikacji satelitarnej [35, 36].

Z powodu trudności sterowania po stronie BSP, FSO dla BSP pozostaje technologią o dużym potencjale, lecz z wyraźną luką w dostępnych rozwiązaniach operacyjnych. Oczekuje się, że dalszy rozwój miniaturyzacji, automatyzacji APT oraz adaptacyjnych algorytmów śledzenia umożliwi przyszłe wdrożenia w zastosowaniach rozpoznawczych, wojskowych i w łączności wysokiego bezpieczeństwa.

4. Komunikacji FSO bez własnej emisji

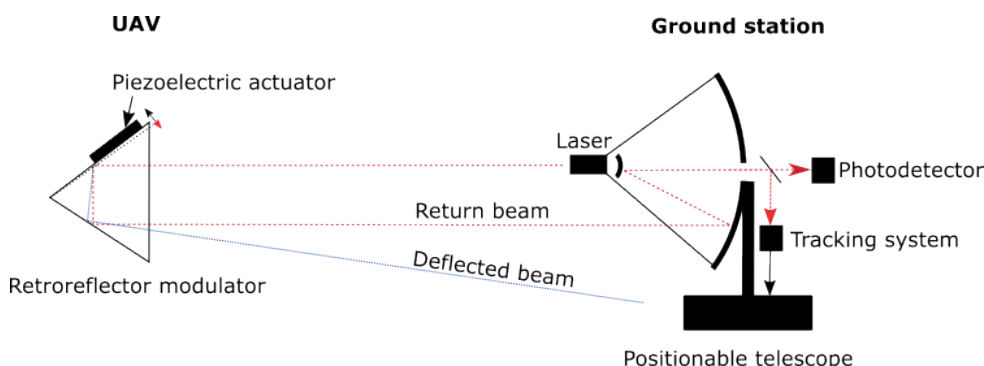
Alternatywnie dla klasycznej komunikacji FSO, autorzy zaproponowali realizację komunikacji FSO bez własnej emisji. Koncepcja zaproponowanego rozwiązania polega na tym, że tylko moduł stacjonarny umieszczony w NSK jest źródłem precyzyjnie kierowanego w stronę BSP promieniowania lasera zmodulowanego wysoką częstotliwością. Precyzja sterowania kierunkiem wiązki lasera wymagana jest tylko po stronie stacji naziemnej. BSP wyposażony jest w elektro-modulator optyczny, który budową zbliżony jest do pryzmatu trójsiennego.

Konstrukcja składa się z trzech lusterek powierzchniowych połączonych ortogonalnie względem siebie. W ten sposób powstaje lekki retro reflektor, odporny na położenie i ruch. W rezultacie padające światło jest odbijane z powrotem do źródła z dużą precyzją, niezależnie od kąta padania. Tor optyczny przebiega w powietrzu, taka konfiguracja eliminuje więc absorpcję materiału i aberrację chromatyczną występującą w retro reflektorach z pryzmatem szklanym.

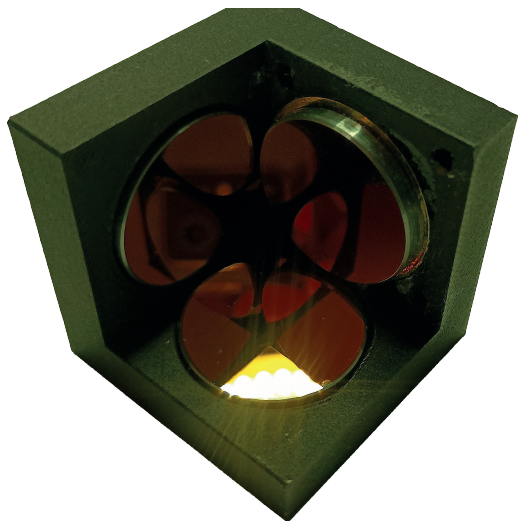
Ponieważ jedno z lusterek zamontowane jest wahlwie na przetworniku piezoelektrycznym – modulator umożliwia odbijanie promieniowania w tym samym kierunku, z którego pada promień lasera lub odbita wiązka może być odchylana. W ten sposób realizowana jest modulacja zwrotna. Na rysunku 5 przedstawiono ideę działania bezemisyjnego FSO.

Opisane rozwiązanie jest pasywne. Modulator BSP sam nie emituje promieniowania ale może w modulowany sposób odbijać promieniowanie, które na niego pada. Wcześniejsze prace autorów nad zastosowaniem modulatora ciekłokrystalicznego wykazały wąskie pasmo przepustowe [37] i dotyczyło pasma w świetle widzialnym. Z powodu zbyt niskiej częstotliwości pracy ciekłego kryształu, zdecydowano na rozwiązanie oparte na piezoelektrycznym sterowaniu zwierciadła. Widok modulatora przedstawiono na rysunku 6.

W literaturze można spotkać różne rozwiązania modulatorów, wśród których najczęściej dominują modulatory DMD (ang. *Digital Micromirror Device*), w których ruch wywoływany jest efektem elektrostatycznym. Miniaturowe zwierciadła o średnicy kilkunastu μm mogą być odchylane o kąt ok. $\pm 12^\circ$. Istnieją również inne rozwiązania oparte na efekcie piezoelektrycznym takie jak lustra do sterowania wiązką skanera laserowego [38] lub rozwiązania o więk-



Rys. 5. Bezemisyjna komunikacja FSO
Fig. 5. Non-emissive FSO communication



Rys. 6. Reflektometr modulowany piezoelektrycznie przetwornikiem umieszczonym pod jednym z luster
 Fig. 6. Piezoelectrically modulated retroreflector with a transducer mounted beneath one of the mirrors

szej częstotliwością działania, jak np. strojone skanery [39]. Są to jednak urządzenia, w których lustra mają bardzo małe średnice dla zapewnienia względnie dużej częstotliwości pozycjonowania. Dlatego aby zwiększyć częstotliwość oraz kąt odchylenia, lustra są miniaturyzowane i wykonywane w technologii MEMS [40]. W [41] przedstawiono rozwiązanie pojedynczego lustra o średnicy 10 mm, które może być odkształcane za pomocą heksagonalnej matrycy kilkudziesięciu elektrod umieszczonych pod jego powierzchnią. W omawianym rozwiązaniu pożądane cechy to duża powierzchnia lustra a czas reakcji na przyłożone napięcie powinien być maksymalnie krótki. Nie jest natomiast wymagana liniowość i duża precyzja odkształceń jak ma to miejsce w astrofizycznej optyce adaptacyjnej. Dostępne są również konstrukcje zwierciadeł o większych średnicach, np. zwierciadła odkształcalne DM (ang. *Deformable Mirrors*) stosowane w systemach optyki adaptacyjnej AO (ang. *Adaptive Optics*), gdzie wykorzystywane są metody elektrostatyczne membranowe [42, 43], magnetyczne MFD (ang. *Magnetic Fluid Deformable Mirror*) [44], a także piezoelektryczne oparte na cienkich foliach PVDF (ang. *Polyvinylidene Fluoride*) [45]. Wymienione metody są rozwiązaniami o niskich częstotliwościach pracy. Aby zwiększyć częstotliwość ruchu zwierciadła zazwyczaj dąży się do zmniejszenia wymiarów (technologia MEMS) albo do minimalizacji grubości zwierciadła.

Ponieważ do budowy modulatora wystarczy odchylenie wiązki lasera tylko jednego ze zwierciadeł w stożku optycznym – zastosowano dwa stacjonarne, naparowane lustra krzemowe oraz jedno lustro zamontowane na przetworniku piezoelektrycznym z kryształem PTZ (ang. *Lead Zirconate Titanate*). Po przyłożeniu napięcia do PTZ, lustro odkształca się, wywołując defleksję odbijanego promieniowania.

W prototypie modulatora wykorzystano fabryczne lustra krzemowe o średnicy 25 mm, stosowane w technice laserowej. Osiągnięta częstotliwość odchylenia lustra wynosiła niepełna 5 kHz. Niska częstotliwość była spowodowana dużą bezwładnością zastosowanego lustra krzemowego oraz właściwościami samego przetwornika piezoelektrycznego. Sterowanie modulatora odbywało się za pomocą generatora funkcyjnego. Transmisję przeprowadzono w warunkach laboratoryjnych na odległości 100 m. Ze względów technicznych promień po drodze był raz odbity od lustra umieszczonego po środku drogi świetlnej. Następnie odbijany promień lasera konwertowany był za pomocą fotodiody PIN, wzmacniany we wzmacniaczu transimpedancyjnym i obserwowany na oscyloskopie. Do eksperymentu użyto lasera zielonego lecz budowa modulatora umożliwia

zastosowanie lasera w paśmie podczerwieni ponieważ promieniowanie w modulatorze jest wyłącznie odbijane. Przeprowadzony eksperyment w warunkach laboratoryjnych potwierdził możliwość modulowania odbijanej wiązki lasera niską częstotliwością. Dalsze prace będą się skupiały na zwiększeniu pasma przepustowego oraz zwiększeniu zasięgu działania.

5. Dyskusja

Rozwój technologii BSP wymusza ciągle udoskonalanie rozwiązań w zakresie łączności – zarówno w aspekcie transmisji danych, jak i kontroli misji. Szczególnego znaczenia nabiera komunikacja w scenariuszach BVLOS (ang. *Beyond Visual Line of Sight*), gdzie tradycyjna łączność radiowa VLOS (ang. *Visual Line of Sight*) nie jest wystarczająca. Aktualne systemy komunikacji radiowej, zwłaszcza te oparte na paśmie ISM (np. 2,4 GHz, 5,8 GHz), są wrażliwe na zakłócenia, charakteryzując się ograniczonym zasięgiem oraz brakiem odporności na zagrożenia wynikające z EW. Przyszłość komunikacji radiowej w BSP wydaje się zmierzać w kierunku:

- adaptacyjnego doboru pasma częstotliwości;
- zwiększenia odporności na zakłócenia i spoofing (m.in. przy użyciu technik SS i ukrywania sygnatury radiowej);
- stosowania TFO jako stałych punktów obserwacyjnych lub przekaźników radiowych w celu zwiększenia strefy Fresnela;
- stosowania SFO w misjach specjalnych;
- wykorzystania systemów hybrydowych – łączących transmisję radiową i FSO.

W obszarze komunikacji FSO obserwuje się rosnące zainteresowanie zastosowaniem jej jako kanału alternatywnego dla łączności radiowej. FSO oferuje szereg zalet: bardzo wysoką przepustowość, odporność na zakłócenia elektromagnetyczne oraz trudność w wykryciu emisji. Główna wada FSO to wymóg stałej widoczności optycznej oraz podatność na zakłócenia atmosferyczne (mgła, opady, turbulencje).

Obiecującymi rozwiązaniami w zakresie zapewnienia precyzyjnego utrzymania wiązki FSO są układy ze sterowanymi lustrami BSM (ang. *Beam Steering Mirrors*). Tego typu systemy pozwalają na dynamiczne kierowanie wiązki laserowej z dużą dokładnością, bez konieczności ruchu całej platformy nadawczej. Technologia ta stosowana jest obecnie w eksperymentalnych terminalach komunikacji optycznej montowanych na satelitach niskoorbitalnych oraz w testach stratosferycznych z udziałem BSP.

Zalety układów ze sterowanymi lustrami to:

- brak elementów mechanicznych dużej masy (co zmniejsza bezwładność i zużycie energii);
- bardzo szybki czas reakcji;
- możliwość integracji z algorytmami śledzenia celu i kompensacji ruchu BSP.

Jednocześnie istnieją też istotne ograniczenia:

- złożoność optoelektroniki;
- konieczność kalibracji i utrzymania precyzyjnej współosiowości optycznej;
- podatność na wibracje i mikrodrżania, szczególnie w warunkach dynamicznego lotu i manewrowania.

W przedstawionym rozwiązaniu bezemisijnego FSO, dużą trudnością było uzyskanie ortogonalności luster w stanie spoczynku (bez pobudzenia przetwornika piezoelektrycznego) podczas montażu luster w korpusie modulatora. W celu zwiększenia częstotliwości masa lustra musi być radykalnie zmniejszona. Ponadto kształt luster powinien być trójkątny, ponieważ przy kształcie kolistym powstają martwe strefy, w których światło nie jest odbijane.

6. Wnioski

Przeprowadzona analiza dostępnych technologii komunikacyjnych dla BSP pozwala stwierdzić, że obecnie nie istnieje jedno uniwersalne rozwiązanie, które zapewniłoby zarówno wysoką przepustowość, niski poziom opóźnień, odporność na zakłócenia oraz pełną niezależność operacyjną. Każdy z badanych systemów, zarówno radiowych jak i optycznych, ma unikalne zalety, ale również szereg ograniczeń technologicznych i eksploatacyjnych.

W przypadku tradycyjnych systemów radiowych szczególną uwagę zwraca ich podatność na zakłócenia elektromagnetyczne oraz ograniczenia zasięgu wynikające z uwarunkowań propagacyjnych. W obszarze komunikacji optycznej FSO zaobserwowano dynamiczny rozwój technologii, jednak nadal pozostaje ona ograniczona przez wymagania związane z widocznością optyczną, precyzją śledzenia oraz warunkami atmosferycznymi. Zastosowanie sterowanych luster w systemach FSO stanowi interesującą alternatywę pozwalającą na dokładne ukierunkowanie wiązki transmisyjnej bez potrzeby mechanicznego przestawiania całej platformy nadawczej. Mimo zalet takich jak szybka reakcja i niska masa, rozwiązania te wciąż wymagają dopracowania pod względem niezawodności oraz odporności na wibracje i zakłócenia atmosferyczne.

Systemy komunikacji z użyciem rozwijanego światłowodu SFO wydają się szczególnie interesujące w kontekście operacji specjalnych, gdzie kluczowe znaczenie ma bezpieczeństwo transmisji oraz odporność na jamming i przechwycenie. Ich ograniczony zasięg i wpływ na dynamikę lotu BSP sprawiają jednak, że nie są to rozwiązania uniwersalne, lecz raczej wyspecjalizowane.

Wnioskiem ogólnym jest potrzeba dalszych badań nad hybrydowymi systemami komunikacji, które łączą różne technologie w celu zapewnienia redundancji i elastyczności działania. Szczególnie istotne wydaje się rozwijanie systemów odpornych na zakłócenia w środowiskach konfliktowych, autonomicznych w zakresie zarządzania łącznością oraz skalowalnych pod względem zasięgu i przepustowości. W przyszłości można spodziewać się integracji wielu kanałów transmisji w ramach inteligentnych systemów zarządzania łącznością na pokładzie BSP, co znacząco zwiększy ich operacyjną niezawodność i bezpieczeństwo misji.

Bibliografia

1. Zidane Y., Silva J.S., Tavares G., *Jamming and spoofing techniques for drone neutralization: An experimental study*, "Drones", Vol. 8, No. 12, 2024, DOI: 10.3390/drones8120743.
2. Chow C.-W., *Recent advances and future perspectives in optical wireless communication, free space optical communication and sensing for 6G*, "Journal of Lightwave Technology", Vol. 42, No. 11, 2024, 3972–3980, DOI: 10.1109/JLT.2024.3386630.
3. Sabour M.H., Jafary P., Nematian S., *Applications and classifications of unmanned aerial vehicles: A literature review with focus on multi-rotors*, "The Aeronautical Journal", Vol. 127, No. 1309, 2023, 466–490, DOI: 10.1017/aer.2022.75.
4. Rappaport T.S., *Wireless Communications: Principles and Practice*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 2nd edition, 2002.
5. Kawabe S., Okada H., Naila Ch.B., Katayama M., *An Experimental Evaluation of Air-to-Air MIMO Transmission in Wireless LAN Relay Systems Using Drones*, International Conference on Information Networking (ICOIN), 2024, 560–564, DOI: 10.1109/ICOIN59985.2024.10572145.
6. Diao J., Debnath B., Mst M. Begum, Molen B.E., Subedi R., *Experimental Demonstration of Flying UAV Swarm-Based Reconfigurable Yagi-Uda Antennas*, "IEEE Transactions on Antennas and Propagation", Vol. 73, No. 5, 2025, 2971–2978, DOI: 10.1109/TAP.2024.3521232.
7. Tesla N., *Method of signaling*, US Patent 723 188, 1903.
8. Du F., *Micro frequency hopping spread spectrum modulation and encryption technology*, 10th International Conference on Computer and Communications (ICCC), 2024, 416–421, DOI: 10.1109/ICCC62609.2024.10941857.
9. Flikkema P.G., *Spread-spectrum techniques for wireless communication*, "IEEE Signal Processing Magazine", Vol. 14, No. 3, 1997, 26–36, DOI: 10.1109/79.587050.
10. Chen W., Ding H., Wang S., Luo J., Gong F., *Jammer-Aided Covert Collaborative UAV Communications Against Directional Beam*, "IEEE Transactions on Communications", Vol. 73, No. 11, 2025, 12413–12429, DOI: 10.1109/TCOMM.2025.3576905.
11. Gu J., Wang B., Liu Y., *Self-tracking technology of Frequency hopping signal based on digital phased array*, IEEE 6th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC), Vol. 6, 2022, 489–495, DOI: 10.1109/ITOEC53115.2022.9734495.
12. Liu Y., Han Y., *A high speed frequency hopping capture synchronization method*, International Communication Engineering and Cloud Computing Conference (CECCC), 2022, 54–58, DOI: 10.1109/CECCC56460.2022.10068903.
13. Saeed M.M., Elnaïm A.A., Babeker A., Barakat M., Hamdan M., Ali E.S., Mokhtar R.A., *Enhancing energy efficiency in UAV cognitive radio networks: A machine learning-based optimization approach*, 1st International Conference on Emerging Technologies for Dependable Internet of Things (ICETI), 2024, DOI: 10.1109/ICETI63946.2024.10777273.
14. Hosen M.S., Peng Y., *Dynamic channel allocation technique for cognitive radio based UAV networks*, International Conference on Artificial Intelligence and Big Data Analytics, 2021, 152–155, DOI: 10.1109/ICAIBDA53487.2021.9689719.
15. Sbouli L., Ghazzai H., Rezki Z., Alouini M.-S., *Energy-efficient power allocation for UAV cognitive radio systems*, IEEE 86th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall), 2017, DOI: 10.1109/VTCFall.2017.8287971.
16. Laniewski D., Lanfer E., Beginn S., Dunker J., Dücker M., Aschenbruck N., *Starlink on the Road: A First Look at Mobile Starlink Performance in Central Europe*, 8th Network Traffic Measurement and Analysis Conference (TMA), 2024, DOI: 10.23919/TMA62044.2024.10559110.
17. Mohan N., Ferguson A.E., Cech H., Bose R., Renatin P.R., Marina M.K., Ott J., *A multifaceted look at starlink performance*, Proceedings of the ACM Web Conference, WWW '24, 2024, 2723–2734, DOI: 10.1145/3589334.3645328.
18. Laniewski D., Lanfer E., Meijerink B., van Rijswijk-Deij R., Aschenbruck N., *WetLinks: A Large-Scale Longitudinal Starlink Dataset with Contiguous Weather Data*, 8th Network Traffic Measurement and Analysis Conference (TMA), 2024, DOI: 10.23919/TMA62044.2024.10558998.
19. Ding J., Tang C., Zhang L., Yue Z., Liu Y., Dan Z., *UAV Communication and Navigation Signals Jamming Methods*, IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC), 2024, DOI: 10.1109/ICSPCC62635.2024.10770465.
20. Karaim M., Elghamrawy H., Tamazin M., Noureldin A., *Investigation of the effects of white gaussian noise jamming on commercial GNSS receivers*, 12th International Conference on Computer Engineering and Systems (ICCES), 2017, 468–472, DOI: 10.1109/ICCES.2017.8275353.
21. Nazzal T., AlQassab B., Alblooshi M., Salman F., Almarzooqi H., Mukhtar H., *Narrowband jamming mitigation*

- in *OFDM systems using time domain interleaving*, IEEE 9th International Conference on Information, Communication and Networks (ICICN), 2021, 130–133, DOI: 10.1109/ICICN52636.2021.9673946.
22. La Pan M.J., Lichtman M., Clancy T.C., McGwier R.W., *Protecting physical layer synchronization: mitigating attacks against OFDM acquisition*, 16th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC), 2013.
23. Perdue L., Klimasewski T., *Testing GPS systems and devices with M-Code*, IEEE AUTOTESTCON, 2016, DOI: 10.1109/AUTEST.2016.7589566.
24. Ezuma M., Erden F., Anjinappa C., Ozdemir O., Guvenç I., *Detection and Classification of UAVs Using RF Fingerprints in the Presence of Wi-Fi and Bluetooth Interference*, “IEEE Open Journal of the Communications Society”, Vol. 1, 2019, 60–76, DOI: 10.1109/OJCOMS.2019.2955889.
25. Fu Y., He Z., *Radio Frequency Signal-Based Drone Classification with Frequency Domain Gramian Angular Field and Convolutional Neural Network*, “Drones”, Vol. 8, No. 9, 2024, DOI: 10.3390/drones8090511.
26. Zhang Y., Kishk M.A., Alouini M.-S., *Deployment optimization of tethered drone-assisted integrated access and backhaul networks*, “IEEE Transactions on Wireless Communications”, Vol. 23, No. 4, 2024, 2668–2680, DOI: 10.1109/TWC.2023.3301880.
27. Guo Y., Mei Q., Guo H., Chen Y., Li Y., *Energy supply scheme for UAV relay base station based on power over fiber technology*, 8th International Conference on Smart Grid and Smart Cities (ICSGSC), 2024, 189–193, DOI: 10.1109/ICSGSC62639.2024.10813961.
28. Khallaf H.S., Knez M., Hranilovic S., *Reliable satellite optical backhaul feeder links for remote areas via fiber tethered aerostats*, IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2024, DOI: 10.1109/WCNC57260.2024.10571070.
29. Song Q., Zeng Y., Xu J., Jin S., *A survey of prototype and experiment for UAV communications*, “Science China Information Sciences”, Vol. 64, 2021, 2668–2680, DOI: 10.1007/s11432-020-3030-2.
30. Satrusalya S., Goswami L., *Review on free space optical communication*, “Materials Today: Proceedings”, International Virtual Conference on Sustainable Materials (IVCSM-2k20), Vol. 81, Part 2, 2023, 231–234, DOI: 10.1016/j.matpr.2021.03.157.
31. Sun N., Wang Y., Wu Y., Liu J., *High-precision tracking of free-space optical communication system on mobile platforms*, “Photonics”, Vol. 11, No. 10, 2024, DOI: 10.3390/photonics11100900.
32. Chang Y.-H., Tsai D.-C., Chow C.-W., Wang C.-C., Tsai S.-Y., Liu Y., Yeh C.-H., *Lightweight Light-Diffusing Fiber Transmitter Equipped Unmanned-Aerial-Vehicle (UAV) for Large Field-of-View (FOV) Optical Wireless Communication*, Optical Fiber Communication Conference and Exhibition (OFC), 2023, DOI: 10.1364/OFC.2023.Th3H.6.
33. Boyarov D.A., Grigoriev V.N., Kuzmin I.V., Petushkov S.V., Murashkin V.V., Polkunov S.V., Lozov R.K., *Free-space laser communication terminals*, International Conference Laser Optics (ICLO), 2024, 459–459, DOI: 10.1109/ICLO59702.2024.10624117.
34. Knapke M., Al-Mudhafar A., Müncheberg S., Shortt K., Soutullo M., *Development of a laser communication terminal for large LEO constellations*, IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS), 2017, 53–58, DOI: 10.1109/ICSOS.2017.8357211.
35. Basu S., Cossu G., Oliviero L., Ciaramella E., *Design of High Speed FSO Feeder Links for HAPS based on COTS Components*, IEEE International Workshop on Metrology for AeroSpace, 2025, DOI: 10.1109/MetroAeroSpace64938.2025.11114580.
36. Moision B., Erkmen B., Keyes E., Belt T., Bowen O., Brinkley D., Csonka P., Eglington M., Kazmierski A., Kim N.-h., Moody J., Tu T., Vermeer W., *Demonstration of free-space optical communication for long-range data links between balloons on Project Loon*, Proceedings SPIE, Vol. 10096, Free-Space Laser Communication and Atmospheric Propagation XXIX, 2017, DOI: 10.1117/12.2253099.
37. Szajewski K., Szajewska A., *Two-Way Free-Space Laser Communication Earth-UAV Without UAV Emission Revealing Its Presence*, Communications in Computer and Information Science, Vol. 2299, 2025, 315–322, DOI: 10.1007/978-3-031-77493-5_28.
38. Lin H.-Y., Cheng H.-C., Liu S.-C., Hsu C.-C., Chen S.-H., Wu M., Liang K.-C., Lai M.-F., Fang W., *Wide angle and high frequency resonant piezoelectric MEMS mirror for laser beam scanning application*, 22nd International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (Transducers), 2023, 1480–1483.
39. Janin P., Bauer R., Griffin P., Riis E., Uttamchandani D., *A high-frequency tunable piezoelectric MEMS scanner for fast addressing applications*, IEEE 34th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), 2021, 294–297, DOI: 10.1109/MEMS51782.2021.9375302.
40. Baran U., Brown D., Holmstrom S., Balma D., Davis W., Muralt P., Urey H., *Resonant PZT MEMS scanner for high-resolution displays*, “Journal of Microelectromechanical Systems”, Vol. 21, No. 6, 2012, 1303–1310, DOI: 10.1109/JMEMS.2012.2209405.
41. Guo X., Xia Y., Xia C., Kanno I., Wang Z., *Design and manufacture of MEMS deformable mirror based on piezoelectric actuator with 61 electrodes*, IEEE 19th International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (NEMS), 2024, DOI: 10.1109/NEMS60219.2024.10639870.
42. Bonora S., Poletto L., *Push-pull membrane mirrors for adaptive optics*, “Optics Express”, Vol. 14, No. 25, 2006, 11935–11944, DOI: 10.1364/OE.14.011935.
43. Tokovinin A., Thomas S., Vdovin G., *Using 50-mm electrostatic membrane deformable mirror in astronomical adaptive optics*, Advancements in Adaptive Optics, Vol. 5490, 2004, 580–585, International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2004, DOI: 10.1117/12.550044.
44. Huang M., Wu Z., Min L., Wu J., *Adaptive surface shape control for magnetic fluid deformable mirrors*, International Conference on Control, Automation and Information Sciences (ICCAIS), 2015, 378–383, DOI: 10.1109/ICCAIS.2015.7338697.
45. Banerjee K., Rajaeipour P., Ataman C., Zappe H., *Piezoelectric PVDF actuated, lightweight deformable thin mirror for adaptive optics*, International Conference on Optical MEMS and Nanophotonics (OMN), 2016, DOI: 10.1109/OMN.2016.7565915.

Inne źródła

46. International Telecommunication Union, *Recommendation ITU-R P.525-4: Calculation of Free-Space Attenuation*, [www.itu.int/rec/R-REC-P.525], 2019.
47. Iridium Communications, *Iridium Certus 700*, [www.iridium.com/services/iridium-certus-700].
48. Ground Control, *What is Iridium Certus & what Speeds are Available?* [www.groundcontrol.com/blog/what-is-iridium-certus-and-what-speeds-are-available-infographic], 2023.

Radio and Optical Communication of Unmanned Aerial Vehicles: A Review of Solutions

Abstract: This article presents a comprehensive review of contemporary communication methods employed in Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in the context of military applications. It discusses classical radio techniques, spread spectrum systems, and other forms of radio transmission that, while ensuring reliable communication, remain susceptible to detection and interference in electronic warfare environments. Particular attention is given to the emerging optical communication technologies in the infrared domain, including Tethered Fiber Optics (TFO), Spooled Fiber Optics (SFO) and Free-Space Optics (FSO), which offer high throughput, low latency, and strong resistance to electromagnetic interference, although they require precise alignment and are sensitive to atmospheric conditions. In response to the increasing challenges posed by the electronic warfare landscape, the authors propose an innovative concept of emission-free FSO communication, in which the UAV does not emit its own signal but instead reflects and modulates a light beam transmitted from a ground control station using an electro-optical modulator based on a piezoelectric mirror. This solution enables secure, bidirectional data transmission with high resistance to interference, representing a promising alternative to traditional UAV communication methods, especially in special operations and reconnaissance missions requiring stealth and reliability.

Keywords: UAV, optical communication, FSO communication, electronic warfare

////////////////////////////////////

mgr inż. Krzysztof Szajewski

krzysztof.szajewski@wat.edu.pl
ORCID: 0000-0002-8429-3976

Absolwent Wydziału Cybernetyki Wojskowej Akademii Technicznej. Od 2021 r. jest zatrudniony na Wydziale Cybernetyki Wojskowej Akademii Technicznej. Pracuje również w Laboratorium Systemów Obserwacyjno-Rozpoznawczych w Instytucie Technicznym Wojsk Lotniczych. Jego zainteresowania koncentrują się na prototypowaniu cyfrowych urządzeń elektronicznych, obrazowaniu cyfrowym oraz cyfrowym przetwarzaniu sygnałów.



dr inż. Anna Szajewska

aszajewska@apoz.edu.pl
ORCID: 0000-0001-8370-6807

Adiunkt w Akademii Pożarniczej w Warszawie, Wydział Inżynierii Bezpieczeństwa i Ochrony Ludności. Zainteresowania naukowe obejmują badania nad rozwojem pożaru zewnętrznego, komputerowe przetwarzanie obrazów, technologię podczerwieni oraz zastosowania termowizji.



inż. Damian Celejewski

damian.celejewski@itwl.pl
ORCID: 0009-0004-0034-6607

Absolwent studiów I stopnia na Wydziale Elektroniki i Technik Informacyjnych Politechniki Warszawskiej (kierunek Elektronika). Student studiów II stopnia na Wydziale Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej (kierunek Elektronika i Telekomunikacja). Zatrudniony na stanowisku starszego inżyniera w Instytucie Technicznym Wojsk Lotniczych w pracowni Systemów Obserwacji i Rozpoznania.

