

Analiza możliwości wykorzystania modemów COTS do zdalnego sterowania bezzałogowej platformy lądowej

Streszczenie. W artykule przedstawiono metodykę oraz wyniki przeprowadzonych pomiarów mających na celu ocenę przydatności dostępnych na rynku COTS (ang. Commercial Off The Shelf) modemów radiowych dla zapewnienia łączności radiowej pomiędzy operatorem a bezzałogową platformą lądową. Zamieszczono opis badanych radiomodemów, jak również ich działanie w różnych warunkach propagacyjnych, na różnych odległościach..

Abstract. This paper presents the methodology and results of measurements COTS (Commercial Off The Shelf) radio modems to provide radio communication between the operator and UGV (Unmanned Ground Vehicle). A description of the tested radio modems and tests prepared with different propagation conditions on different distances are presented. (Analysis of using COTS radio modems for Unmanned Ground Vehicle remote).

Słowa kluczowe: UGV, COTS, zdalne sterowanie, radiokomunikacja

Keywords: UGV, COTS, remote control, radiocommunication

Wstęp

Bezzałogowe platformy lądowe są coraz częściej wykorzystywane zarówno w działaniach wojskowych jak i cywilnych. Dzięki nim istnieje mniejsze ryzyko utraty życia ludzi biorących udział w tych operacjach. Niestety urządzenia te są w dalszym ciągu kosztowne, co powoduje ograniczenia w ich stosowaniu. Dlatego też, podczas konstruowania pojazdów bezzałogowych, jednym z ważnych aspektów jest ich minimalny koszt produkcji.

Jednym z ważnych elementów w bezzałogowych pojazdach jest łączność pomiędzy pojazdem a operatorem. Musi się ona charakteryzować w głównej mierze dużymi zasięgami i małymi opóźnieniami. Ponadto pojazdy te muszą działać w różnych warunkach klimatycznym i propagacyjnych [1], przez co wymagania na urządzenia łączności są bardzo wysokie.

Celem przeprowadzonych pomiarów była ocena przydatności dostępnych na rynku COTS (ang. Commercial Off The Shelf) modemów radiowych [2] dla zapewnienia łączności bezprzewodowej pomiędzy operatorem a bezzałogową platformą lądową. Urządzenia powinny zapewnić wymianę danych w dwóch kanałach logicznych: sterowania i wideo. Oprócz zasięgu maksymalnego oraz czasu opóźnienia transmisji badano wpływ działania zewnętrznych sensorów na pracę radiomodemów oraz wpływ transmisji bezprzewodowej na poprawność działania sensorów.

W artykule przedstawiono charakterystykę urządzeń do transmisji wąskopasmowej (kanał zdalnego sterowania) oraz do transmisji obrazu wykorzystywanych w badaniach. Następnie opisano metodykę wykonywanych pomiarów oraz otrzymane wyniki. Autorzy dokonali również podsumowania oraz przedstawili wnioski z przeprowadzonych badań dotyczące wyboru odpowiedniego radiomodemu służącego do komunikacji z bezzałogowymi platformami lądowymi.

Charakterystyka badanych urządzeń

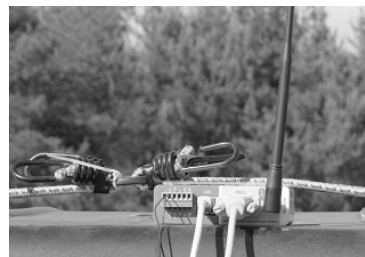
Zestaw nadawczo odbiorczy pracujący w paśmie 433 MHz (rys. 1) przeznaczony jest do zastosowań w systemach pomiarowych i zdalnego sterowania. Posiada on wbudowaną korekcję błędów oraz przeplot, zapewniający przepływność 9,6 kbit/s. Moc nadawcza tego modemu wynosi 100 mW. Został on uzupełniony o konwerter poziomów/interfejsów USB/RS232 zbudowany z wykorzystaniem układu scalonego firmy FTDI, przedłużacz USB oraz obudowę z ABS zabezpieczającą układy elektroniczne przed uszkodzeniem mechanicznym. Moduły

mogą być adresowane poprzez nadanie numerów, jednakże nie posiadają funkcji retransmisyjnych. Para modułów wyposażonych w anteny dookólne Odbi dostarczane przez sprzedawcę tworzyła łącze radiowe P-P.



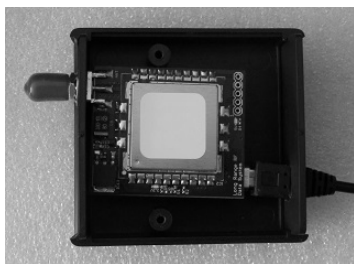
Rys.1. Zestaw nadawczo-odbiorczy z modemem pracującym w paśmie 433 MHz

Modem bezprzewodowy pracujący w paśmie ISM 868 MHz z mocą do 500 mW przeznaczony do zastosowań w systemach pomiarowych, zdalnego sterowania oraz zarządzania, z możliwością korekcji błędów, szyfrowania, filtracją adresów (rys. 2.). Został skonfigurowany do trybu pracy P-P oraz P-R-P (łącze uzupełnione o retransmitter). Zabezpieczenie mechaniczne zapewnia fabryczna obudowa metalowa. Modemy skonfigurowane zostały do pracy z przepływnością 19,2 kbit/s z wyłączonymi wszelkimi opcjami, które mają wpływ na czas opóźnienia transmisji, celem zmniejszenia opóźnienia minimalnego. Transmisja między punktami radiowymi odbywała się z wykorzystaniem portu RS232C, port Ethernet wykorzystywany był wyłącznie do konfiguracji i diagnostyki urządzeń oraz sieci. Podczas pracy w łączu radiowym radiomodemy wyposażone były w anteny dostarczone przez producenta.



Rys. 2. Stanowisko mobilne z radiomodemem pracującym w paśmie 868 MHz

Kolejnym badanym modelem był radiowy moduł nadawczo-odbiorczy pracujący w paśmie 915 MHz, z mocą 250 mW przeznaczony do zastosowań w systemach pomiarowych i zdalnego sterowania, z trybem skaczącej częstotliwości – FH (ang. Frequency Hopping) zapewniający przepływność do 115,2 kbit/s został umieszczony w obudowie z ABS zabezpieczającą układy elektroniczne przed uszkodzeniem mechanicznym (rys. 3.). Ze względu na kolizję częstotliwości z pasmem telefonii komórkowej GSM w Polsce moduły te testowane były jedynie w komorze bezodbiorniczej, a wyniki uzyskanych pomiarów należy traktować jako szacunkowe. Para modułów tworzyła łącze radiowe P-P.



Rys. 3. Modem pracujący w paśmie 915 MHz na płycie OEM z dołączonym interfejsem USB

Ostatnim badanym modelem był dwupasmowy router bezprzewodowy pracujący w paśmie ISM 2,4 GHz i 5 GHz z mocą 100mW przeznaczony do budowy sieci radiowych dla transmisji danych i video z przepływnością 300 Mbit/s (2,4 GHz) lub 450 Mbit/s (5 GHz), możliwością wykorzystania multipleksacji obu pasm radiowych, funkcją szyfrowania, zaawansowaną filtracją adresów (rys. 4.). Routery wykorzystywane były w trybach pracy P-P oraz P-R-P, a źródłem danych strumieniowych były kamery Ethernet. Zabezpieczenie mechaniczne zapewnia fabryczna obudowa ABS. Podczas pracy w łączu radiowym routery wyposażone były w anteny 5dBi dostarczane przez producenta.



Rys. 4. Stanowisko mobilne z routerem WiFi i kamerą

Metodyka wykonywanych pomiarów

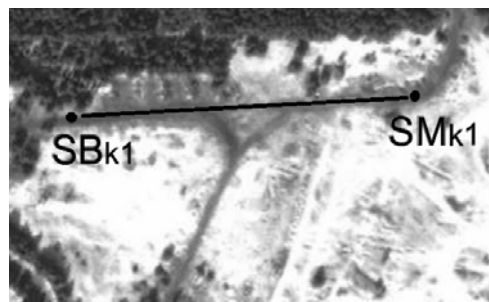
Pomiary zostały przeprowadzone w dwóch etapach. W pierwszej kolejności badano maksymalny zasięg łączności radiowej, a następnie dla uzyskanego zasięgu maksymalnego badano opóźnienia transmisji. Dodatkowo badana była kompatybilność elektromagnetyczna [3] łączności bezprzewodowej oraz sensorów (georadarów) montowanych na bezzałogowej platformie lądowej.

Starano się określić minimalny czas opóźnienia, dlatego wszelkie dodatkowe procesy (szyfrowanie, korekcja błędów itp.) zostały wyłączone. Parametry związane z minimalną długością pakietów transmisyjnych zostały tak dobrane, aby ramki przesyłane były między radiomodemami jak najszybciej. Taka konfiguracja pozwalała na określenie minimalnego opóźnienia sprzętowego. Dodatkowo dla

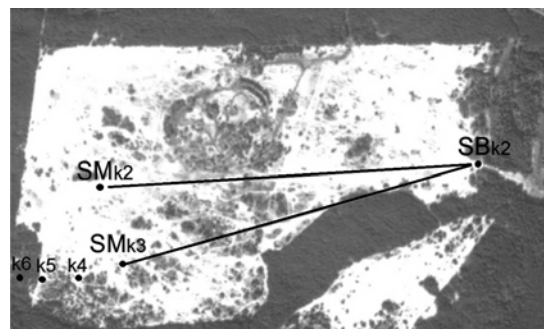
kanalu wizyjnego parametry transmisji strumieniowej ustawiono na 5 Mbit/s.

Dla oznaczenia punktów przyjęto SB - stacja bazowa, SM – stacja mobilna, SR – stacja retransmisyjna. Testy wykonane zostały w dwóch lokalizacjach, dla następujących warunków:

a) bezpośredniej widoczności optycznej (brak przeszkód w pierwszej strefie Fresnela)(ang. LOS - Line of Sight) [1] – w praktyce dla dużych odległości problemem jest zapewnienie całkowitego braku przeszkód w pierwszej strefie Fresnela, na dostępnym do testów obszarze, w którym przesłonięcie wynosiło poniżej 10%; położenie punktów pomiarowych przedstawiają rysunki 5 – 7.



Rys. 5. Droga ruchu stacji mobilnej dla małych odległości



Rys. 6. Położenie punktów pomiarowych dla dużych odległości



Rys. 7. Częściowe przesłonięcie pierwszej strefy Fresnela dla dużych odległości – widok z SMk2

b) braku bezpośredniej widoczności (ang. NLOS - Non Line of Sight) [1] – teren średnio zurbanizowany z budynkami o wysokości nie przekraczającej dwóch kondygnacji wykonanymi w technologii mieszanej, punkty pomiarowe umieszczone wzdłuż drogi o szerokości jednego pasa ruchu w każdym kierunku, przy drodze drzewa, krzewy, oświetlenie uliczne oraz znaki drogowe, a także pojedyncze osoby poruszające się wzdłuż ciągów pieszych oraz poruszające się i zaparkowane pojedyncze pojazdy; położenie punktów pomiarowych przedstawia rysunek 8.

c) braku bezpośredniej widoczności z retransmisjami (NLOS+R) – te same warunki propagacyjne jak w NLOS, dodatkowo retransmitter umiejscowiony w obrębie skrzyżowania, przesłonięcie między punktami pomiarowymi; położenie punktów pomiarowych przedstawia rysunek 9.



Rys. 8. Droga ruchu stacji mobilnej dla NLOS



Rys. 9. Droga ruchu stacji mobilnej dla NLOS z retransmisją

Stanowisko pomiarowe dla trybu P-P LOS i NLOS składało się z dwóch stacji: nieruchomej bazowej symulującej wóz dowodzenia oraz mobilnej pełniącej rolę bezzałogowej platformy lądowej.

Stanowisko pomiarowe dla trybu P-R-P składało się z trzech stacji: nieruchomej bazowej symulującej wóz dowodzenia, nieruchomej stacji retransmisyjnej, stacji mobilnej pełniącej rolę bezzałogowej platformy lądowej.

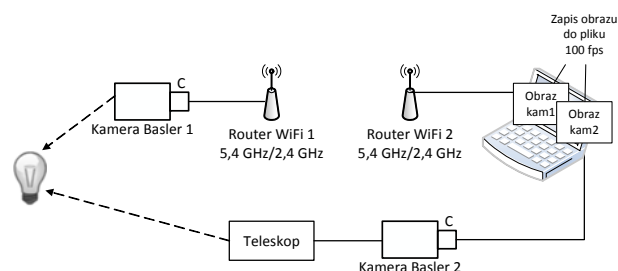
Podczas pomiaru zasięgu łącza dla trybu P-P, przy spełnieniu warunku LOS stacja mobilna zwiększała odległość w stosunku do stacji bazowej, będąc w bezpośredniej widoczności. Odnotowywana była odległość między stacjami, przy której nastąpił brak łączności. Dla warunku NLOS stacja mobilna zwiększała odległość w stosunku do stacji bazowej. Bezpośrednia widoczność radiowa przesłaniana była przez budynki, drzewa i inne przeszkody. Odnotowane zostało położenie stacji mobilnej oraz odległość między stacjami, przy której nastąpił brak łączności.

Dla trybu P-R-P stacja retransmisyjna znajdowała się na granicy zasięgu ze stacją bazową. Stacja mobilna zwiększała odległość w stosunku do stacji bazowej i retransmisyjnej. Bezpośrednia widoczność radiowa przesłaniana była przez budynki, drzewa i inne przeszkody. Odnotowane zostało położenie stacji mobilnej oraz odległość między stacjami (retransmisyjną i bazową a mobilną), przy której nastąpił brak łączności, a także błędy transmisji.

Pomiary opóźnienia łącza zdalnego sterowania oraz wideo zostały wykonane w odległości maksymalnego zasięgu pomiędzy stacjami.

Pomiar opóźnienia transmisji danych w kanale zdalnego sterowania odbywał się poprzez wysyłanie wiadomości pomiędzy stacjami zsynchronizowanymi za pomocą GPS z użyciem oprogramowania terminalowego. Opóźnienie transmisji wyliczone zostało jako różnica czasu pomiędzy czasem odebrania a czasem nadania wiadomości.

Pomiaru opóźnień transmisji w kanale wideo dokonano metodą różnicową dokonując akwizycji obrazu przekazywanego drogą radiową oraz rejestrowanego drogą optyczną z wykorzystaniem teleskopu (rys. 10. oraz rys. 11.).

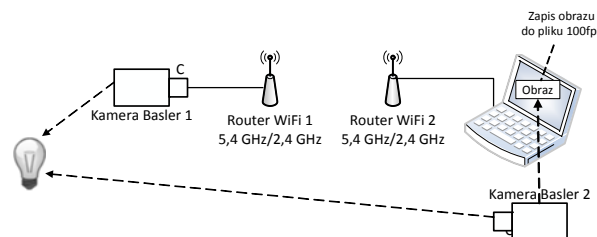


Rys. 10. Schemat stanowiska do pomiaru opóźnień video z torem optycznym



Rys. 11. Tor optyczny stanowiska do pomiaru opóźnień video

Układ przedstawiony na rysunku 10. wymaga określenia opóźnienia przetwarzania video z pominięciem toru optycznego. Do tego celu zestawiono kolejne stanowisko pomiarowe przedstawione na rysunku 12.



Rys. 12. Schemat stanowiska do pomiaru opóźnień video

Wpływ włączenia sensorów na zasięg łączności

Biorąc pod uwagę przewidywaną odległość anten od sensora na stacji symulującej bezzałogową platformę lądową umiejscowiony został sensor i po określeniu maksymalnego zasięgu pomiędzy stacjami sensor został uruchomiony. Stacja mobilna pracuje ze stałą mocą. Określony został wpływ sensora na kanał łączności. W przypadku zakłóceń podejmowana była próba określenia zmniejszenia zasięgu.

Badano również wpływ transmisji radiomodemów na czułość sensorów (rys. 13). W tym przypadku po włączeniu sensora stacja mobilna zwiększała moc do maksymalnej dozwolonej.



Rys. 13. Sensor zamocowany na stanowisku pomiarowym

Tabela 1. Wyniki zasięgów i opóźnień transmisji dla kanału zdalnego sterowania

URZĄDZENIE				Modem 433 MHz	Modem 868 MHz	Modem 915 MHz
Odległość SB-SM [m]	Oznaczenie punktów	Wysokość anteny SB [m]	Wysokość anteny SM [m]	Opóźnienie [ms] (liczba przesyłanych znaków)		
212	SBk1, SM w kierunku SMk1	1	1,7	164 (12)	95 (12)	294 (12)
600	SBk1, SMk1			421 (30)	BŁĘDY (30)	375 (30)
1200	SBk2, SMk2			230 (12)	212 (12)	379 (12)
1210	SBk2, SMk3	1,7	1,5	523 (12)	441 (12)	515 (12)
1260	SBk2, SMk4			891 (12)	BRAK ŁĄCZNOŚCI	572 (12)
1310	SBk2, SMk5			515 (12)	BRAK ŁĄCZNOŚCI	581 (12)
1340 (las 30 m)	SBk2, SMk6			368 (12)	BRAK ŁĄCZNOŚCI	585 (12)
				400 (12)	BRAK ŁĄCZNOŚCI	474 (12)

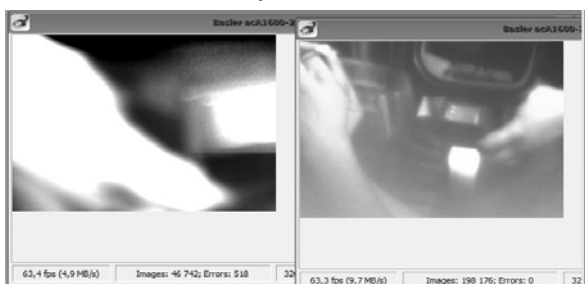
Wyniki pomiarów

Wyniki pomiaru zasięgów oraz opóźnień łączności bezprzewodowej dla kanału zdalnego sterowania uzyskane dla lokalizacji LOS opisanej w pkt. a) przedstawia tabela 1. Podane wyniki są wartościami uśrednionymi z małej próby. Zmiany wysokości anteny SM w zakresie kilkudziesięciu cm nie dawały zauważalnej poprawy wyników. Zaobserwowano znaczne fluktuacje otrzymywanych opóźnień (dochodzące do 20% wartości).

Opóźnienia uzyskane dla lokalizacji LOS opisanej w pkt. 3.1a są dla routerów WiFi pomijalnie małe. Uzyskana w układzie pomiarowym (rys. 10.) rozdzielczość pomiaru 20 ms nie wykazała opóźnień (rys. 14. – rys. 16). Zastosowana alternatywna metoda badania opóźnień dla małych pakietów (ping 32 bajty) wykazała bardzo niskie opóźnienia (średnio 5 ms).



Rys. 14. Widok z kamer obu torów przed inicjacją błyskiem – podstawa czasu obu torów zsynchronizowana



Rys. 15. Widok z kamer obu torów w momencie wyzwolenia błysku – podstawa czasu obu torów zsynchronizowana



Rys. 16. Badanie opóźnienia transmisji z wykorzystaniem stopera – podstawa czasu obu torów zsynchronizowana

Wyniki pomiaru zasięgów oraz opóźnień łączności bezprzewodowej uzyskane dla lokalizacji NLOS opisanej w pkt. b) przedstawia tabela 2. Podane wyniki są wartościami uśrednionymi z małej próby. Zmiany wysokości anteny SMw1 w zakresie kilkudziesięciu cm nie dawały zauważalnej poprawy wyników. Zaobserwowano znaczne fluktuacje poziomu sygnału dla odległości bliskich wartościom granicznym zależne od położenia stacji mobilnej. Anteny na stacji mobilnej umieszczano na wysokości 1m, na stacji sterowania (SBw1) na wysokości 1,7 m. Dla łącza video silne zakłócenia w paśmie ISM spowodowane bliskością nadajników często powodowało zrywanie łącza jednak typowe opóźnienia nie przekraczały 10 ms.

Tabela 2. Wyniki zasięgów i opóźnień transmisji dla NLOS z wyłączonym georadarem

Parametr	Urządzenie				
	Modem 433 MHz	Modem 868 MHz	Modem 915 MHz	Router	
				2,4 GHz	5,2 GHz
Zasięg SBw1-SMw1[m]	450	300	700	210	210
Opóźnienie [ms]	147	215	250	10	10

Wyniki pomiaru zasięgów oraz opóźnień łączności bezprzewodowej uzyskane w warunkach dla lokalizacji NLOS+R opisanej w pkt. c) przedstawia tabela 3. Podane wyniki są wartościami uśrednionymi. Odległość od stacji zdalnego sterowania SBw2 do stacji retransmisyjnej SRw2 ustalono na 240m. Anteny wszystkich stacji umieszczono na wysokości 1,5m. Pomiar realizowany był z przemieszczeniem stacji mobilnej od SRw2 w kierunku SMw2. Wyniki w tabeli 3 zawierają zasięg sumaryczny SBw2->SRw2+SBw2->SMw2. Dla łącza video pasmo 2,4 GHz nie udało się zmierzyć maksymalnego zasięgu ze względu na duże zakłócenia od innych sieci WLAN pracujących w tym paśmie. Dodatkowo interferencje i przeszkody ruchome znajdujące się pomiędzy stacjami, silne zakłócenia w paśmie ISM spowodowane bliskością nadajników, powodowało zrywanie łącza, jednak typowe opóźnienia nie przekraczały 10 ms. W radiomodemach pracujących w paśmie 868 MHz występowały przekłamania dla dłuższych pakietów.

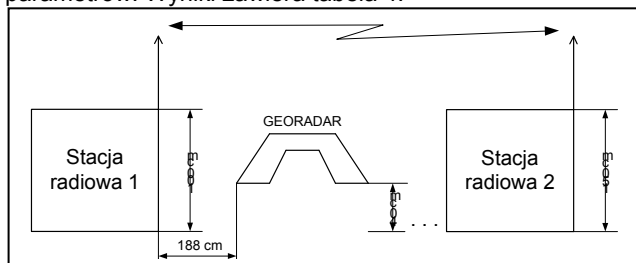
Tab. 3. Wyniki zasięgów i opóźnień transmisji dla NLOS+R z wyłączonym georadarem

Parametr	Urządzenie		
	Modem 868 MHz	Router 2,4 GHz	Router 5,2 GHz
Zasięg SBw2-SMw2[m]	480	-	250
Opóźnienie [ms]	204	10	10

Tab. 4. Wyniki zasięgów i opóźnień transmisji dla NLOS z wyłączonym oraz obserwacje z włączonym georadarem

Parametr	Urządzenie				
	Modem 433MHz	Modem 868MHz	Modem 915MHz	Modem 2,4 GHz	Modem 5,2 GHz
GEORADAR WYŁĄCZONY					
Zasięg [m]	450	300	700	210	210
Opóźnienie [ms]	147	215	250	10	10
GEORADAR WŁĄCZONY					
Wpływ włączenia georadaru	Parametry bez zauważalnych zmian	Łączność przerywana. Podniesienie anteny na wysokość 170 cm poprawia jakość łącza	Parametry bez zauważalnych zmian	Łączność całkowicie zerwana, Podniesienie anteny na wysokość 160 cm przywraca łącze	Parametry bez zauważalnych zmian

Stanowisko pomiarowe do badania kompatybilności elektromagnetycznej [1] przedstawia rysunek 17. Na stacji 1, pełniącej rolę bezzałogowej platformy lądowej, zostały zamontowane anteny o charakterystyce dookólnej na wysokości 150 cm. W odległości 188cm od stacji 1 został umieszczony georadar, którego antena była zawieszona na wysokości 40 cm. Badanie miało na celu wykazać wpływ pracy georadaru na jakość transmisji bezprzewodowej. W tym celu został określony maksymalny zasięg łączności bez włączonego georadaru w warunkach NLOS oraz opóźnień w łączu. Następnie włączano georadar i obserwowano zmianę wyznaczonych wcześniej parametrów. Wyniki zawiera tabela 4.



Rys. 17. Stanowisko do badania kompatybilności elektromagnetycznej łączności bezprzewodowej i georadaru

Podobne badanie wykonane dla warunków LOS nie wykazały wpływu włączonego georadaru na zasięgi i opóźnienia transmisji w łączu.

Wnioski

W urządzeniach wybieranych do pracy w systemach transmisji danych, w środowisku z licznymi źródłami zakłóceń, w terenie zurbanizowanym i dla aplikacji mobilnych, gdzie następuje koncentracja niekorzystnych zjawisk w kanale radiowym sugeruje się wybór urządzeń wyposażonych w:

- technikę skakania po częstotliwościach FH (ang. Frequency Hopping) [3],
- możliwość adaptacji puli wykorzystywanych częstotliwości ze zbioru przydzielonych w technice FH czyli zastosowanie techniki adaptacyjnego skakania po częstotliwościach AFH (ang. Adaptive Frequency Hopping) [4], co dodatkowo utrudnia zakłócanie celowe sygnału,
- adaptacyjną automatyczną regulację mocy nadajnika AAPC (ang. Adaptive Automatic Power Control) w zadanym zakresie (np. poprzez ustalenie maksymalnej mocy wyjściowej) opartej o np. pomiar elementowej stopy błędów (ang. Bit Error Rate), co pozwoli na uwolnienie użytkownika

od konieczności definiowania mocy wyjściowej w celu uzyskania kompromisu maksymalnego zasięgu i jak najmniejszego zużycia energii oraz uniknięcia samozakłócania sieci radiowej,

- technikę MIMO [5] (ang. Multiple Input, Multiple Output), co zwiększa odporność na zaniki Rayleigha i pozwala uzyskać większy stosunek sygnału do szumu w odbiorniku, a w przypadku zastosowania multipleksacji możliwy wzrost wynikowej przepływności,
- transmisję wielozakresową, dzięki czemu urządzenie w przypadku zakłócenia danego pasma częstotliwości może przełączyć się na alternatywne pasmo,
- definiowaną długość minimalną transmitowanego pakietu (nawet od pojedynczych bajtów), dzięki czemu w systemach sterowania krytycznych czasowo, w których rozmiar przesyłanych wiadomości jest niewielki) można znacząco zmniejszyć opóźnienie transmisji.

Mimo wyboru do testów szeregu urządzeń z różnego segmentu rynku tylko część urządzeń COTS posiada zaimplementowane wybrane z wyżej wymienionych rozwiązań, co nie zapewnia odpowiednio niskich opóźnień transmisji i zasięgu maksymalnego oraz odporności na zakłócenia. Jedynym rozwiązaniem jest opracowanie własnego urządzenia. Wyposażając systemy w urządzenia docelowe należy pamiętać o możliwości szyfrowania transmisji oraz zapewnienia kompatybilności elektromagnetycznej urządzeń znajdujących się na robocie.

LITERATURA

- [1] Katulski R., Propagacja fal radiowych w telekomunikacji bezprzewodowej, WKŁ, 2014
- [2] Harris Corporation, Radio Communications In the Digital Age, 2005
- [3] PN-T-01030:1996, Kompatybilność elektromagnetyczna – Terminologia
- [2] C. Brown, P. Vigneron, Robust Frequency Hopping for High Data Rate Tactical Communications, 2006
- [2] C. Brown, P. Vigneron, Adaptive Use of Spectrum in Frequency Hopping Multi-Band Transmission, 2006
- [2] G. Tsoulos, MIMO System Technology for Wireless Communications, CRC Press, 2006

Autorzy: dr hab. inż. Jerzy Łopatka – prof. WAT, E-mail: jlopotka@wat.edu.pl, mgr inż. Radosław Chęciński, E-mail: rchecinski@wat.edu.pl, mgr inż. Anna Kaszuba, E-mail: akaszuba@wat.edu.pl, mgr inż. Robert Krawczak, E-mail: rkrawczak@wat.edu.pl, Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Telekomunikacji Wydziału Elektroniki, ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa 49