

WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA

WYDZIAŁ CYBERNETYKI



Praca dyplomowa magisterska

Mobilny system zarządzania i sterowania  
bezpilotowym statkiem latającym

Norbert Waszkowiak

**Promotor:**

dr inż. Michał Dyk

Potwierdzam przyjęcie pracy

Warszawa, 2022

# Contents

## Wstęp

Wstęp - text

Zadania do zrealizowania w pracy:

- Prezentacja zagadnienia BSP oraz koncepcji ich wykorzystania;
  - Przegląd i prezentacja technologii mobilnych z uwzględnieniem aspektów tworzenia aplikacji i komunikacji M2M;
  - Projekt mobilnego systemu zarządzania i sterowania bezpilotowym statkiem latającym;
  - Implementacja systemu;
  - Testy systemu oraz prezentacja użycia na wybranym case study.
-

# 0.1

Prezentacja zagadnienia bezpilotowych  
statków latających oraz koncepcji ich  
wykorzystania

text

## 0.1.1 Historia BSP

text

## 0.1.2 Technologia i producenci BSP

text

## 0.1.3 Zastosowania BSP

text

## 0.1.4 Dostosowywanie drona do wymagań użytkownika

text

# 0.2

# Przegląd i prezentacja technologii mobilnych z uwzględnieniem aspektów tworzenia aplikacji i komunikacji M2M

W tym rozdziale przedstawiono technologie komunikacji bezprzewodowej wykorzystywane w komunikacji M2M, ze szczególnym uwzględnieniem komunikacji pomiędzy bezzałogowym statkiem powietrznym, a kontrolerem. Analizę wykorzystywanych rodzajów komunikacji dokonano na podstawie oferty najpopularniejszego producenta dronów konsumenckich DJI.

## 0.2.1 Komunikacja M2M

Komunikacja M2M (machine-to-machine) służy do definiowania technologii, która umożliwia wymianę informacji pomiędzy urządzeniami w sieci bez jakiegokolwiek ingerencji ludzi. Sztuczna inteligencja wraz z metodami uczenia maszynowego znacznie ułatwia takie procesy, między innymi umożliwia ona podejmowanie autonomicznych decyzji przez te urządzenia. Ta komunikacja jest podstawą istnienia IoT.[?]

### Cel

Głównym celem M2M jest przenoszenia danych z sensorów do sieci. W porównaniu do innych technologii, które umożliwiają monitorowanie zasobów, korzysta ona często z dostępnych publicznie sieci np. GSM, co redukuje jej koszty utrzymania. Można wyróżnić 3 elementy takiego systemu:

- łącze do przesyłu danych, np. WiFi, GSM, RFID
- sensory, np. czujnik temperatury, kamera
- oprogramowanie, które umożliwia podejmowanie zautomatyzowanych decyzji

Najpopularniejszą dziedziną tej technologii, jest telemetria. Jej celem jest pomiar wybranej wielkości i jej przesyłanie do centralnej jednostki, oddalonej od miejsca

pomairu. Na początku do tego celu były wykorzystywane linie telefoniczne, a następnie radiowe. Rozwój technologii, a w tym łączności bezprzewodowej sprawił, że rola wykorzystywania telemetrii w nauce inżynierii i produkcji poszerzyła się do użytku codziennego w jednostkach grzewczych, mierników elektrycznych i wszelkich urządzeń podłączonych do internetu.[?]

## Wymagania

Według Europejskiego Instytutu Norm Telekomunikacyjnych (ETSI) komunikacja M2M musi spełniać następujące wymagania:

- **Skalowalność:** w miarę dołączania kolejnych urządzeń do systemu system nadal musi funkcjonować;
- **Anonimowość:** na każde żądanie, w związku z wymaganiami prawnymi system musi umożliwiać ukrywanie tożsamości urządzenia;
- **Logowanie:** ważne wydarzenia w systemie, takie jak: pojawienie się błędnych informacji czy nieudane próby instalacji, muszą być zarejestrowane, a rejestry te muszą być dostępne na żądanie;
- **Zasady komunikacji między aplikacjami:** aplikacje w systemie powinny mieć możliwość komunikowania się. W szczególności bramki i urządzenia końcowe komunikujące się za pomocą technologii SMS czy Ethernet powinny komunikować się za pomocą połączenia P2P (peer-to-peer);
- **Metody dostarczania:** w ramach systemu powinny być dostarczane metody komunikacji takie jak: *unicast*, *multicast*, *broadcast* i *anycast*, a wszędzie gdzie to możliwe metoda *broadcast* powinna być zastąpiona za pomocą *multicast*, tak aby zminimalizować obciążenie sieci;
- **Harmonogram przesyłania komunikatów:** dostęp do sieci powinien być kontrolowany, tak samo, jak harmonogram przesyłania komunikatów. Sam system powinien również uwzględniać obciążenia aplikacji M2M w harmonogramie przesyłania wiadomości;
- **Wybór ścieżek komunikacyjnych:** ścieżki w systemie powinny zapewniać optymalizację bazującą na: awariach transmisji, kosztu i opóźnieniach, w momencie, gdy istnieją inne ścieżki do punktu docelowego. [?]

## 0.2.2 Technologie komunikacji M2M

Gdyby w technologii tak samo, jak w literaturze występowały epoki, aktualnie znajdowalibyśmy się w epoce połączonych ze sobą obiektów. IoT (Internet of Things) zdobywa aktualnie coraz więcej uwagi nie mał w każdej domenie, a szczególnie w takich jak biznes, elektronika konsumencka, przemysł czy transport. Niemal każdy obiekt elektryczny w dzisiejszym świecie jest ze sobą połączony w ten czy inny sposób. Siedząc w biurze, za pomocą dostarczanych aplikacji, możemy kontrolować drzwi, bramę garażową, czajnik elektryczny czy rolety okienne w naszym domu. W mieście kontrolujemy kamery i oświetlenie z odległych lokacji. IoT odgrywa w tym ważną rolę, ponieważ to ono umożliwia łączenie przeróżnych obiektów, za pomocą sieci połączeń i wymianę danych między nimi.[?]

### Ogólna klasyfikacja technologi M2M

Poniżej przedstawiono ogólne porównanie technologii komunikacyjnych M2M.

	<b>Local Area Network</b> Komunikacja krótko dystansowa	<b>Low Power Wide Area</b> Internet Of Things	<b>Cellular Network</b> Tradycyjne M2M
<b>Użycie</b>	40%	45%	15%
<b>Zalety</b>	- Dobrze ugruntowana norma - W budynkach	- Niskie zużycie energii - Niskie koszty - Pozycjonowanie	- Istniejące pokrycie znacznego obszaru - Duża prędkość transmisji
<b>Wady</b>	- Wysokie zużycie energii elektrycznej - Duży koszt sieci i zależności	- Niska prędkość transmisji - Wschodzący standard	- Wysoki koszt posiadania - Mała autonomia
<b>Technologia</b>	Bluetooth, WiFi	LoRa	GSM, 3G, 4G, 5G

Table 1: Porównanie rodzajów technologii M2M.[?]

### LoRa

LoRa (Long Range) to nowa technologia połączeń bezprzewodowych w świecie IoT, która ostatnio ewoluowała i zyskała szczególną popularność, w urządzeniach z ograniczoną pojemnością elektryczną umożliwiając systemom wbudowanym przesyłanie małej ilości danych na dużych dystansach w krótkich interwałach czasowych.

Komunikacja w aplikacjach IoT jest dzisiaj wykonywana w przeróżnych technologiach, a każda z nich ma swoje zalety, funkcje, a przez to też przeznaczenie. Żadna z tych technologii nie może pokryć całego zapotrzebowania świata IoT, ponieważ wszystkie one posiadają cechy, które czynią je odpowiednie dla postawionego konkretnego zadania.

WiFi to najpopularniejsza technologia komunikacji bezprzewodowej, która ewoluowała przez wiele lat i jest wykorzystywana przede wszystkim do komunikacji na dużych odległościach. Na krótkie dystanse mamy przeznaczone do tego np. Bluetooth czy ZigBee. We wszystkich z nich największą wadą jest duże zużycie energii elektrycznej. Technologia LoRa zapewnia bezpieczne, mobilne dwukierunkowe połączenie o niskim koszcie elektrycznym, wykorzystywane jest ono w IoT, szczególnie w domenie smart city, czy nawet ogólnej komunikacji M2M. LoRa zalicza się do LPWA (Low Power Wide Area), czyli rodzaju bezprzewodowej rozległej sieci telekomunikacyjnej, stworzonej w celu umożliwienia komunikacji na duże odległości przy niskiej przepływności i niskim poborze energii. [?] W tego typu komunikacji wyróżnia się LoRa ze względu na jej:

- długodystansowość;
- dwukierunkowość;
- wysoką pojemność węzłów w sieci;
- długość życia na baterii;
- odporność interfejsów;
- bezpieczeństwo i efektywność sieci. [?]

Cechy            Technologie tą wyróżniają następujące cechy:

- Pojedyncza bramka może pokryć obszar aż  $100km^2$ ;
- Oferuje ona podwójne szyfrowanie AES;
- Bazuje na technologii CSS (widmo rozproszone Chirp), które umożliwia śledzenie obiektów i jest odporne na zanikanie sygnałów;
- Topologia gwiazdy eliminuje zanikanie danych przez urządzenia pośrednie, co przyczynia się do zmniejszenia poboru mocy. [?]

Ograniczenie przepustowości            W sieci LoRa wszystkie klasy ramek wymagają potwierdzenia, co wiąże się z tym, że po każdym potwierdzeniu ramki przez urządzenie końcowe w dowolnym oknie czasowym następuje okres wyłączenia, w celu zachowania zgodności z przepisami dotyczącymi cyklu pracy. W związku z tym, aby uniknąć wyczerpania limitu pojemności przez sieć i urządzenia końcowe, muszą one ograniczyć liczbę potwierdzeń. Również w podsieciach LoRa po przesłaniu danych następuje okres wyłączenia, w którym na danym kanale nie są wysyłane żadne dane. Te dwa okresy, tzn. okres wysyłania danych i wstrzymania transmisji stanowi cykl pracy, dlatego to w sieci LoRa przepustowość jest ograniczona cyklem pracy.[?]

## Narow band IoT

Wraz z rozwojem świata IoT NB-IoT stało się wiodącą technologią komunikacji komórkowej dla zdalnych pomiarów w całej Europie. NB-IoT to technologia dostępu radiowego, która ponownie używa komponentów stworzonych przez jej poprzednika LTE, aby umożliwić jej działanie na licencjonowanej częstotliwości. Może ona również działać w trybie autonomicznym. Tak jak sama nazwa wskazuje, cały system działa w wąskim spektrum częstotliwości, bo tylko w 200kHz, co wprowadza elastyczność zastosowań dzięki minimalnym wymaganiom częstotliwości, w porównaniu do jej poprzednika LTE. Cała szerokość 200kHz została podzielona na kanały po 3.75 kHz lub 15 kHz, co umożliwia połączenie w bardzo wysoką prędkość nadawania, a także daleki zasięg połączenia, biorąc pod uwagę wąskie widmo sygnału. [?]

## NB-IoT vs Lora

Parametr	LoRa	NB-IoT
Pasma	125 kHz	180 kHz
Pokrycie	165 dB	164 dB
Żywotność baterii	15+ lat	10+ lat
Maksymalne natężenie elektryczne	32 mA	120 mA
Spoczynkowe natężenie elektryczne	1 $\mu$ A	5 $\mu$ A
Przepustowość	50 Kbps	60 Kbps
Opóźnienie	Zależne od klasy urządzenia	10 s
Bezpieczeństwo	AES 128 bit	3GPP (128 to 256 bit)
Geolokalizacja	Tak (TDOA)	Tak (In 3GPP Rel 14)
Jakość/cena	Wysoka	Średnia

Table 2: Porównanie technologii LoRa i NB-IoT [?]

Zarówno LoRa jak i NB-IoT należą do wspomnianej wcześniej technologii LPWAN. Podstawowe różnice pomiędzy tymi dwoma technologiami można dostrzec w zużyciu baterii, prędkości transmisji i opóźnieniach.

### 0.2.3 Komunikacja bezprzewodowa w dronach konsumenckich

Shenzhen DJI Sciences and Technologies Ltd., znany powszechnie pod nazwą handlową DJI, jest obecnie największym producentem dronów konsumenckich. W



2020r. firma ta posiadała 70% udziału w światowym rynku. [?] Przeglądając katalog ich produktów, można wyróżnić tylko 3 technologie komunikacji bezprzewodowej: wzomocnione WiFi (ang. enhanced WiFi), Lightbridge, OcuSync.

## WiFi

WiFi nie zostało wprowadzone ściśle do komunikacji bezprzewodowej statków powietrznych, ale odnajduje się w tym całkiem dobrze. Jest ona wykorzystywana głównie w bardziej budżetowych wersjach dronów, ze względu na możliwość skorzystanie przez producenta z posiadanej przez użytkownika infrastruktury (smartfonów), czy niskiej ceny komponentów.

Przykładowo dron *DJI Tello*, który jest najtańszą opcją dostępną od producenta DJI, przeznaczoną głównie do nauki latania, a nawet praktycznie programowania przez najmłodszych pasjonatów, nie posiada on w zestawie dedykowanego kontrolera. Kontrolowanie drona odbywa się za pomocą aplikacji na smartfona, która łączy się z dronem za pomocą WiFi tak jak do punktu dostępowego z internetem. Zasięg takiego połączenia według producenta to 100m [?].



Figure 1: DJI Tello[?]

W swojej ofercie DJI ma również dostępnego drona *DJI Mini SE*, który również korzysta z technologii WiFi, ale w swoim wyposażeniu posiada dedykowany do niego kontroler. Taka konfiguracja pozwala na uzyskanie zasięgu do 2 km. [?]

WiFi jest także bardzo podatne na wszelkie zakłócenia, wynikające z ukształtowania terenu czy zaszumienia sieci pochodzącego z istniejących sieci domowych. Wyprodukowanie drona w tej technolgi jest najtańszą dostępną opcją, która umożliwia transmisję obrazu, jednak należy pamiętać, aby nie stawiać jej przy tym za dużych wymagań. WiFi stanowi bardzo dobry punkt startowy w komunikacji bezprzewodowej bezzałogowych statków powietrznych.

## Lightbridge

Lightbridge to technologia od DJI, która doczekała się jej dwóch wydań. Pierwszych wzmianek o niej można doszukiwać się w 2014 roku. [?], a drugiego wydania już w 2015 roku[?]. Obecnie nie jest już rozwijana, a producent skupił się na rozwoju jego drugiej technologii: OcuSync.

Technologie prezentowane przez DJI mają parę cech zbliżające je do WiFi, przede wszystkim transmisja ta odbywa, gdyż odbywa się ona na tej samej częstotliwości: 2,4GHz. Była ona kierowana głównie do dronów z wyższego pułapu cenowego, dlatego że jej produkcja była bardzo kosztowna, a koszt wynikał z tego, że producent opracował to rozwiązanie na swoim autorskim układzie scalonym i oprogramowaniu. Wskutek czego pozwoliło to osiągnąć duże lepsze wyniki niż transmisja po WiFi. Zasięg lotu według producenta to odległość do 5km.

## OcuSync

OcuSync został po raz pierwszy zademonstrowany przez producenta wraz z wydaniem drona *Mavic Mini Pro*. Pierwsze wydanie tej technologii pozwalało na transmisję do 7km na częstotliwości 2,4GHz. Obraz mógł być przesyłany w rozdzielczości 720p i 1080p. Jakość fullHD była dostępna tylko na krótszych odległościach, gdy dystans się zwiększał, a dostępna prędkość transmisji spadała, dron przechodził automatycznie na transmisję w 720p. Opóźnienie było rzędu 160-170ms. A największą cechą wyróżniającą tę technologię była możliwość podłączenia jednocześnie dwóch kontrolerów i do 4 urządzeń odbiorczych.

Kolejnym krokiem było wydanie kolejnej wersji oznaczonej jako OcuSync 1.5, w której dodano transmisję również na częstotliwości 5Ghz. Zmniejszono także opóźnienia w transmisji. Dodatkowo technologia umożliwiała automatyczną zmianę kanałów komunikacyjnych w trakcie lotu na te najmniej obciążone. W pierwszej wersji kanał transmisji można było wybrać tylko przed startem bezzałogowego statku powietrznego.



Figure 2: Pierwsza wersja gogli do FPV od DJI [?]



Figure 3: Dji OcuSync Air Unit[?]

Wraz z wydaniem nowej wersji zaprezentowano gogle DJI przeznaczone do transmisji obrazu w trybie FPV (ang. first person view, widok pierwszo-osobowy) i również OcuSync Aircraft System, czyli zintegrowanego systemu umożliwiającego sterowanie i transmisji obrazu z wykorzystaniem tej technologii w dronach i pojazdach DIY.

Producent w trakcie swojej historii doprowadził do pewnych nieścisłości, mimo że dron *Phantom 4 pro v 2.0* korzystał teoretycznie z najnowszej wersji OcuSync, ale nie posiadał on możliwości zmiany kanałów transmisji w trakcie lotu, opóźnienie zależało też od tego, czy korzystano z kontrolera dołączonego do zestawu, czy jego droższej, lepiej wyposażonej wersji: *DJI RC Plus*.



Figure 4: DJI Phantom v2.0[?]

Wersja 2.0 wprowadziła dalsze ulepszenia, m.in. kontrolowanie dronów na jeszcze większe dystanse i z jeszcze mniejszymi opóźnieniami, a także kompatybilność wsteczną po aktualizacji oprogramowania.



Figure 5: DJI RC plus[?]

## FHSS i OFDM

Zarówno Lightbridge, jak i OcuSync używają szyfrowanej modulacji OFDM (ang. Orthogonal Frequency-Division Multiplexing, zwielokrotnianie z ortogonalnym podziałem częstotliwości)) dla transmisji obrazu i z formy FHSS (ang. Frequency-Hopping Spread Spectrum) dla transmisji sygnałów sterowania. Kanał dla transmisji obrazu nie zmienia się w trakcie całego lotu, pod warunkiem, że nie następują zakłócenia, albo użytkownik nie ustawi ręcznie innej częstotliwości. Z kolei metoda FHSS "skacze" po częstotliwościach w całym dostępnym widmie, w tym nawet w pasmie przeznaczonym do transmisji obrazu.[?] [?]

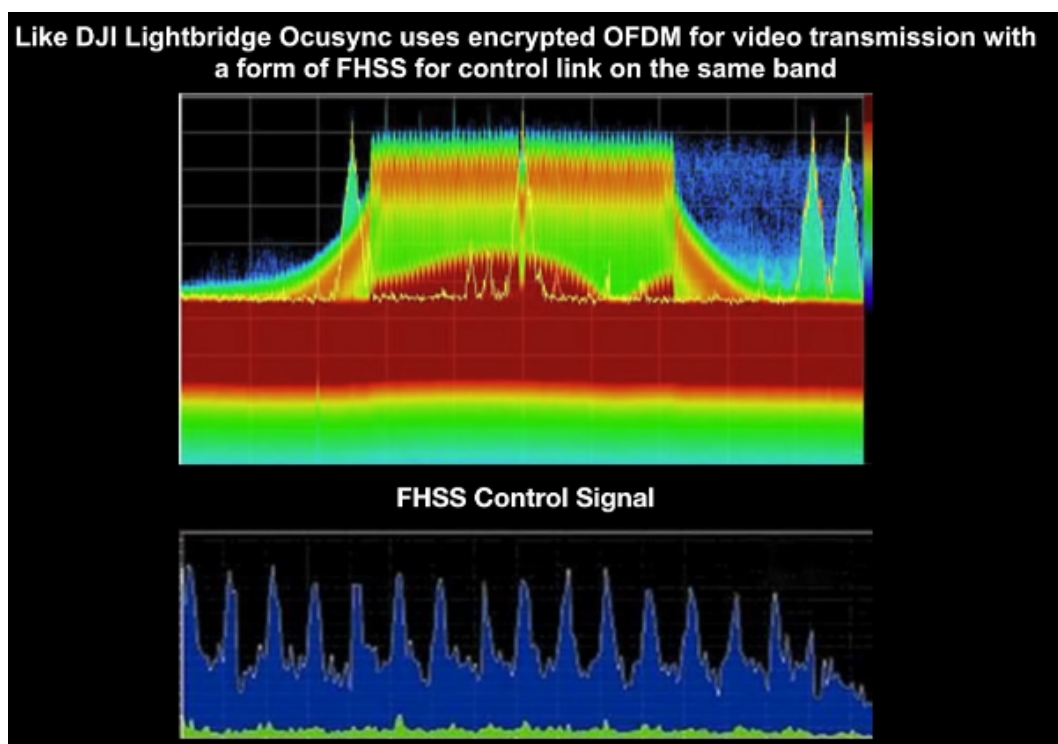


Figure 6: Widmo OFDM i FHSS[?]

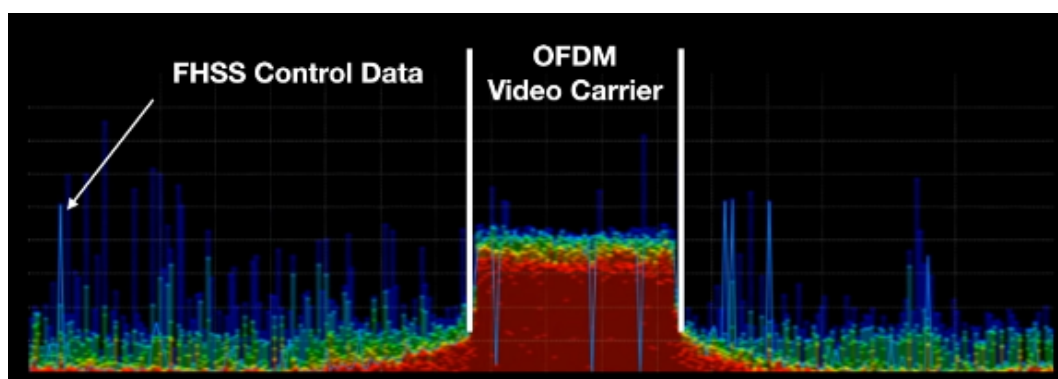


Figure 7: Widmo OcuSync z zaznaczoną modulacją FHSS i OFDM[?]

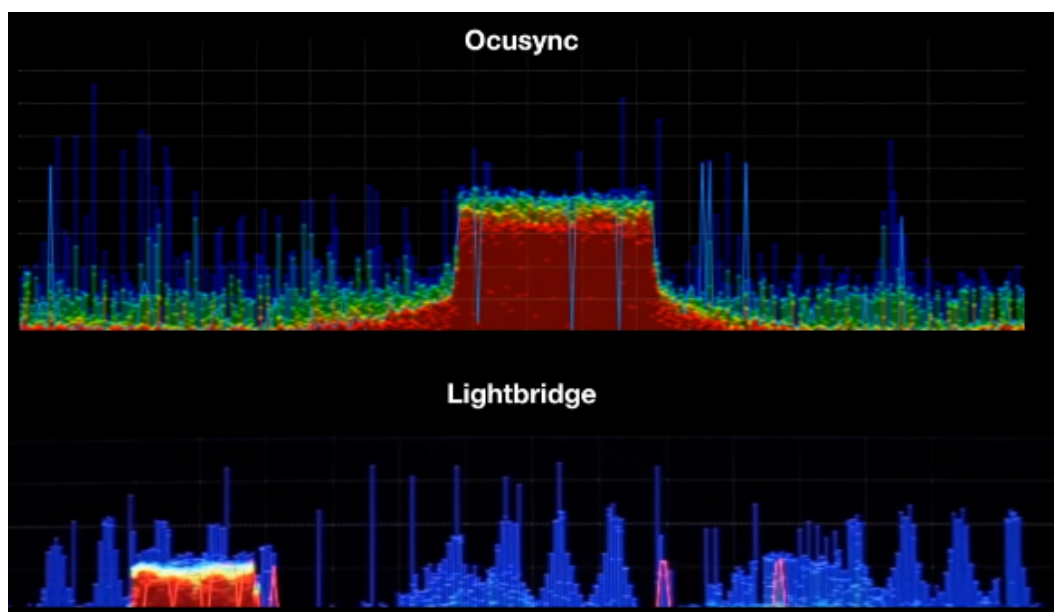


Figure 8: Porównanie widma OcuSync i Lightbridge [?]

### Przewaga OcuSync nad Lightbridge

OcuSync stało się główną technologią rozwijaną przez DJI, ponieważ wykorzystuje ono istniejące układy scalone przeznaczone do komunikacji WiFi. Producent wytwarza na nie swoje własne oprogramowanie, które można następnie aktualizować. Lightbridge był ich własnym układem scalonym, którego oprogramowania nie można było aktualizować, w dodatku komunikacji opierała się wyłącznie na paśmie 2,4GHz. Nowe procesory w układach WiFi dzięki coraz większej częstotliwości pracy zapewniły osiągnięcie tych samych efektów co Lightbridge, bez dodatkowego kosztu wynikającego z produkcji własnego układu scalonego.

### 0.2.4 Sterowanie dronami za pomocą API dostarczanego od producenta

Przeszukując internet w poszukiwaniu bezzałogowych statków powietrznych umożliwiających ich sterowanie za pomocą API od producenta można napotkać głównie rozwiązania od DJI. Wszystkie pozostałe rozwiązania nie działają na gotowych dronach, a na oprogramowaniu przeznaczonym do wgrania na wybranych jednostkach do sterowania modelami RC.

Najpopularniejszym tego rozwiązaniem jest ArduPilot, czyli pakiet oprogramowania nawigacyjnego działającego w pojeździe wraz z oprogramowaniem sterującym stacją naziemną.

## DJI SDK

DJI dostarcza do swoich produktów następujące interfejsy API:

- **App Dev.** - interfejsy API przeznaczone do sterowania dronem z poziomu stacji bazowej, kontroler stanowi interfejs pośredniczący między aplikacją wykorzystującą SDK a dronem powietrznym:
  1. **Mobile SDK** - SDK przeznaczona na platformę iOS i Android. Aplikacja na smartfon za pomocą kabla USB podłączonego do kontrolera statku powietrznego realizuje zaprogramowaną logikę działania.
  2. **UX SDK** - Mobile SDK rozszerzony o elementy interfejsu użytkownika, co przyspiesza znacznie proces tworzenia oprogramowania.
  3. **Windows SDK** - SDK umożliwiające wydawanie aplikacji na systemach operacyjnych Windows.
- **Payload Dev.** - interfejsy API przeznaczone do nadawania logiki działania drona na poziomie samego drona, dzięki temu po utracie zasięgu może ona dalej funkcjonować zgodnie z zaprogramowaną logiką. Opcja dostępna dla najdroższych wersji dronów DJI, które można dostosowywać do swoich wymagań za pomocą odpowiednich rozszerzeń, np. kamery termowizyjnej
  1. **Payload SDK** - zestaw narzędzi programistycznych umożliwiających tworzenie oprogramowania do rozszerzeń, które mogą być montowane na dronach DJI.
  2. **Onboard SDK** - otwarcie źródłowa umożliwiająca komunikację bezpośrednią z wybranymi dronami i kontrolerami za pomocą interfejsu szeregowego.

0.3

# Projekt mobilnego systemu zarządzania i sterowania BSP

## 0.3.1 Wymagania funkcjonalne

text

## 0.3.2 Wymagania pozafunkcjonalne

text

## 0.3.3 Stos technologiczny

text

### Java

text

### Kotlin

text

### DJI Mobile SDK

text

### Lombook

text

### Springboot

text



## Android

text

### 0.3.4 Uzasadnienie warstwy pośredniczącej

text

### 0.3.5 Wysokopoziomowy diagram systemu

text

### 0.3.6 Diagram komponentów

text

### 0.3.7 Diagram klas i sekwencji

text

## Gradle

text

### 0.3.8 Wykorzystane urządzenia

text

# 0.4

## Implementacja systemu

text

# 0.5

Testy systemu oraz prezentacja użycia na  
wybranym case study

text

## 0.5.1 Scenariusz testowy autonomicznego lotu pomiędzy dwoma punktami

text

## 0.5.2 Scenariusz testowy autonomicznego lotu patrolowego

# Bibliography

- [1] “NB-IoT vs Lora” <https://ubidots.com/blog/lorawan-vs-nb-iot/#lorawan-vs-nb-iot-a-quick-overview>
  - [2] “machine-to-machine (M2M)” <https://www.techtarget.com/iotagenda/definition/machine-to-machine-M2M>
  - [3] “LPWA wikipedia” <https://pl.wikipedia.org/wiki/LPWAN>
  - [4] “LoRa Technology - An Overview, IEEE, 2018” <https://ieeexplore.ieee.org/document/8474715>
  - [5] “On the Performance of Narrow-band Internet of Things (NB-IoT) for Delay-tolerant Services, IEEE, 2019” <https://ieeexplore.ieee.org/document/8768871>
  - [6] “Wikipedia: SZ DJI Technology Co., Ltd.”, <https://pl.wikipedia.org/wiki/DJI>, 2022;
  - [7] “DJI Mavic Mini SE”, <https://www.dji.com/pl/mini-se?site=brandsite&from=nav>, 2022;
  - [8] “DJI store”, <https://store.dji.com>, 2022;
  - [9] “DJI Lightbridge”, <https://www.dji.com/pl/dji-lightbridge/info>, 2022;
  - [10] “DJI Lightbridge2”, <https://www.dji.com/pl/lightbridge-2/info#specs>, 2022;
  - [11] “Wikipedia: OFDM”, <https://pl.wikipedia.org/wiki/OFDM>, 2022;
  - [12] “Wikipedia: FHSS”, <https://pl.wikipedia.org/wiki/FHSS>, 2022;
  - [13] “DJI Mavic 2 - Ocusync 2.0 What is it & What’s Compatible ? + How is it different from Lightbridge”, <https://www.youtube.com/watch?v=gfqcSv9sR0A>, 2022;
  - [14] “DJI Gogle”, [https://u.cyfrowe.pl/600x0/2/7/2\\_732250420.png](https://u.cyfrowe.pl/600x0/2/7/2_732250420.png), 2022;
-

## List of Figures

# List of Tables