

Radiokomunikace podporovaná bezpilotními leteckými prostředky UAV

Doc. Ing. Václav Žalud, CSc

*Katedra radioelektroniky FEL, ČVUT v Praze
vaclavzalud@email.cz; <http://radio.feld.cvut.cz/>*

© Doc. Ing. Václav Žalud, CSc

U2

Bezpilotní letecké prostředky UAV Základní informace

Definice a hlavní charakteristiky UAV

- **Definice UAV:** Bezpilotními vzdušnými prostředky UAVs (unmanned aerial vehicles), označovanými též zkratkou UAS (unmanned aerial systems), jsou: letadla, drony, vzducholodě a balóny bez lidské posádky.
- **Výška letu:** Prostředky UAV jsou určeny pro lety ve výškách od několika metrů až do několika desítek kilometrů. UAV pohybující se ve výškách pod 10 km (tj. v troposféře) se označují zkratkou LAP (low altitude platform), systémy pro výšky nad 10 km (tj. ve stratosféře) nesou označení HAP (high altitude platform).
- **Provozní rizika:** Z hlediska provozních rizik (bezpečnosti provozu) se UAV dělí do tří následujících kategorií: UAV s nízkým rizikem (open: low risk), středním rizikem (specific: medium risk) a vyšším rizikem (certified: higher risk) (tuto klasifikaci zavádí dokument CEPT ECC Rep. 268, 2018).
- **Ruční resp. robotické řízení:** Všechny uvedené typy mohou být řízeny na dálku, pověřenou osobou nebo robotem nacházejícím se na zemi, nebo v jiném leteckém zařízení resp. v kosmu.
- **Autonomní řízení:** UAV však mohou také létat polo anebo zcela autonomně, s využitím softwarově řízeného letového plánu instalovaného do jejich zabudovaného systému, kooperujícího s palubními senzory, případně s družicovou navigací (GPS, Galileo ap).

Čtyři základní kategorie UAV

Drones



Aircraft



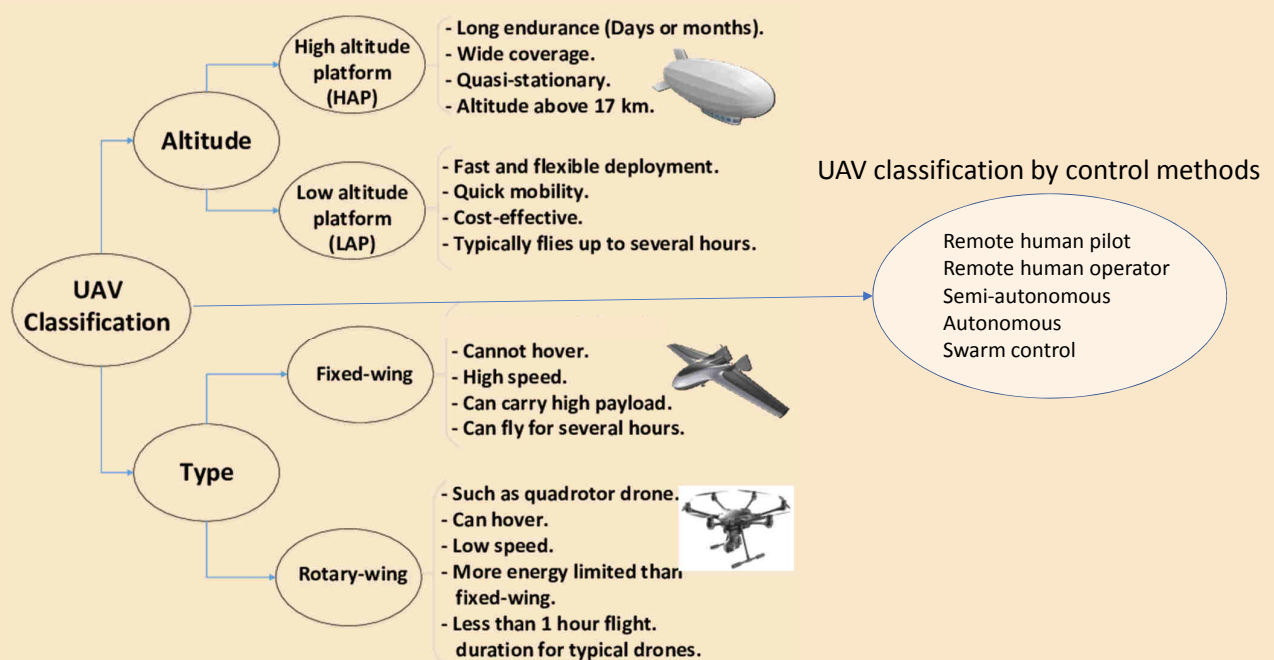
Airship



Tethered Helikite



UAV Classification



Parametry dvou velkých vojenských bezpilotních letadel (US vs. Indian Drones)

COMPARISON WITH US DRONE

US Drone-Global Hawk:

- Length-13.5m
- Wingspan-35.4m
- Height-4.6m
- Empty-Weight-3850kg
- Max loaded weight-10400kg
- Maximum speed-650kmph
- Service ceiling-20000m
- Endurance-34hours



Indian Drone-Rustom-II:

- Length-9.5m
- Wingspan-20.6m
- Height-6.1m
- Empty weight-1800kg
- Max loaded weight-2150kg
- Maximum Speed-225kmph
- Service ceiling-10668m
- Endurance-14hours



Jeden z nejmenších současných dronů



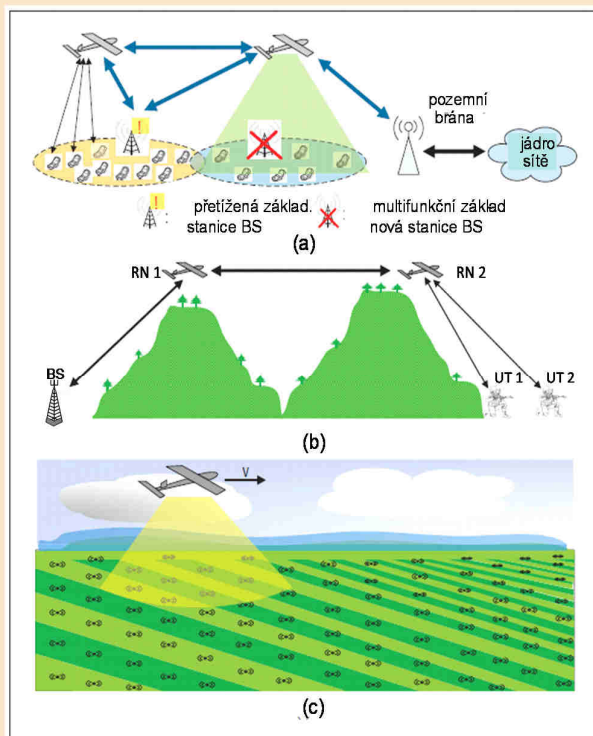
Nový typ vojenského dronu s dlouhou dobou letu (40 hodin)



The new larger version (2018) of the military drone with wings 79 feet long can fly for 40 hours at a time rather the 27 hours current models can manage, and marks the start of a US massive upgrade programme for the drone. During the flight, the craft launched, climbed to 7,500 feet (initial flight altitude), completed basic airworthiness maneuvers, and landed without incident.

Oblasti využití prostředků UAV

Tři hlavní oblasti využití rádiové komunikace s podporou UAV



Všudypřítomné pokrytí podporované UAV (UAV aided ubiquitous coverage)

Rádiové reléování podporované UAV (UAV aided radio relaying)

Šíření informací a sběr dat s podporou UAV (UAV aided information dissemination and data collection)

Všudypřítomné pokrytí podporované UAV (UAV aided ubiquitous coverage) je realizováno **asistencí UAV již existujícím pozemním komunikačním infrastrukturám**, kterým se takto napomáhá zajistit bezešvé rádiové služby uvnitř celého obsluhovaného území.

Reléování podporované UAV (UAV aided relaying) využívá některého UAV, jakožto retranslační stanice – nazývané reléový uzel RN (relay node), **k zajištění bezdrátové konektivity** mezi hlavní stanicí BS a jedním, nebo i **mezi více vzdálenými uživateli**, kteří nemají vzájemné spolehlivé přímé spojení.

Šíření informací a sběr dat podporované UAV (UAV-aided information dissemination and data collection), "k"od" **velkého počtu prostorově rozptýlených uživatelů**. U obou aplikací se předpokládá, že vysílaná, nebo přijímaná data nejsou citlivá na zpoždění přenosu. **Systém může zefektivnit komunikace D2D mezi pozemními terminály.**

Drone Use Cases

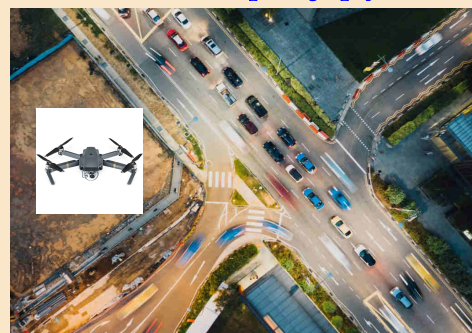
Cargo delivery



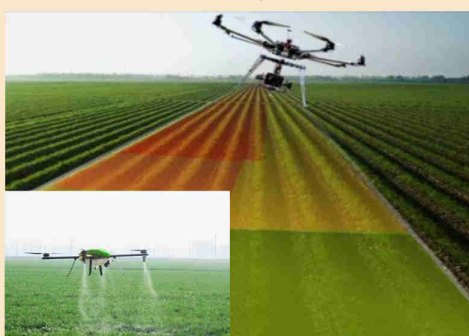
Aerial drone inspection



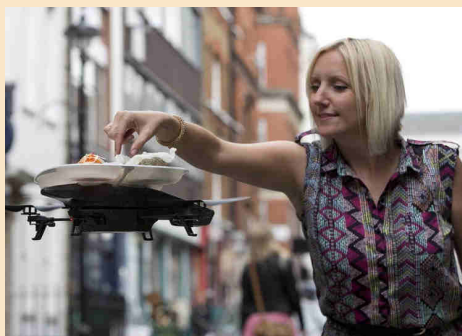
Aerial drone photography



Precision Agriculture



Sushi drone



Drone swarm technology for...



Drone use cases

20 Commercial Drone Use Cases

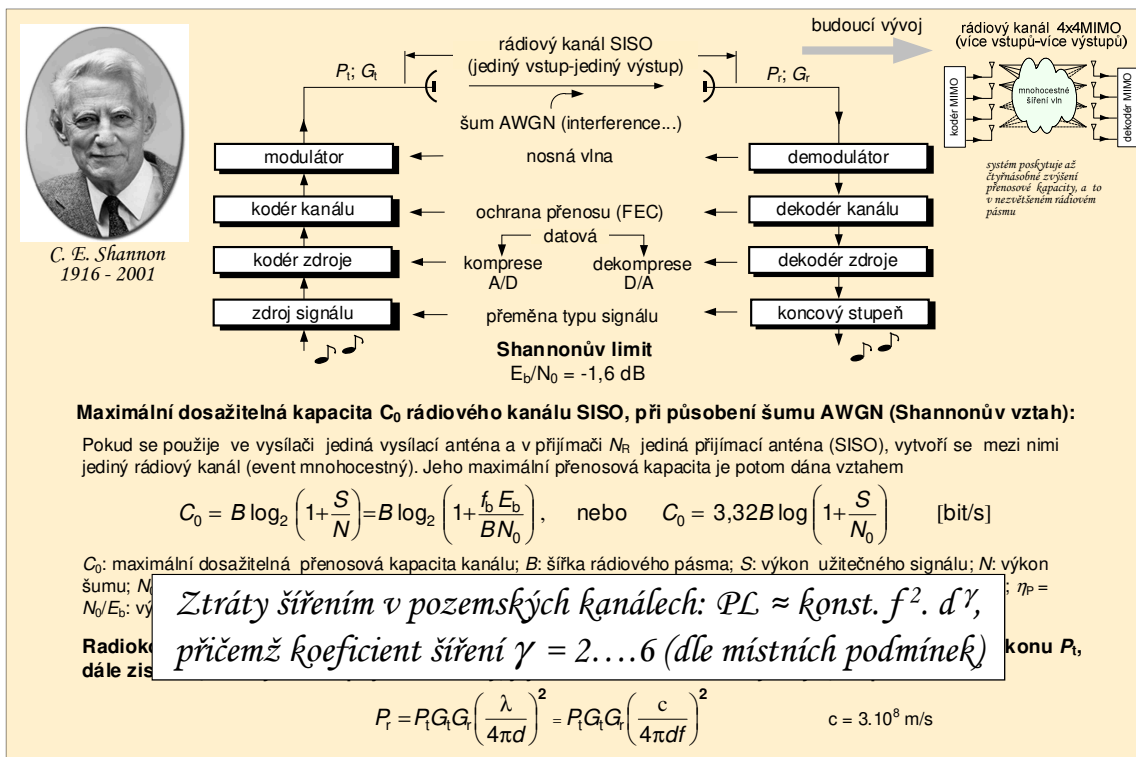


Discover the leading drone innovators: <https://www.ventureradar.com/>

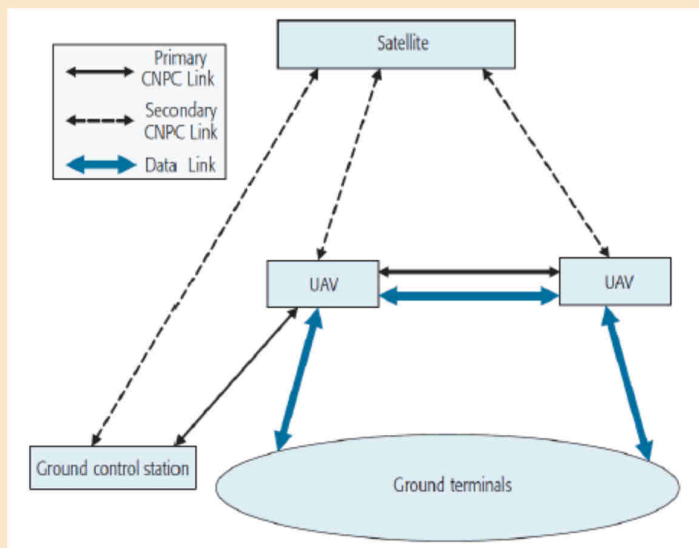


Základní síťová architektura

Obecné Shannonovo schéma radiokomunikačního systému v klasické koncepci SISO (Shannon 1948)



Síťová architektura radiokomunikačního systému, podporovaného prostředky UAV



Komunikace UAV-GCS se původně realizovala technikou PtP (Point to Point), často v nelicencovaných nechráněných pásmech ISM, v nichž je ale velice nespolehlivá. Výrazné vylepšení však přináší UAV komunikace s podporou buňkových sítí v licencovaných pásmech

Rádiový komunikační systém s prostředky UAV, obsahuje jednak linky CNPC, jednak datové linky DL.

Linky CNPC (control and non-payload communications) nenesou žádné uživatelské informace, nýbrž jen zajišťují pomocnou, vysoce spolehlivou nízkolatenční duplexní komunikaci, obvykle s malou datovou rychlostí a důkladnou ochranou proti zneužití.

Datové linky (data links) pak přenášejí uživatelská data, s rychlostmi řádu kbit/s až Gbit/s (dle aplikace), obvykle s menšími nároky na latenci a zabezpečení.

Obě linky využívají více rádiových pásem. Pro komunikaci CNPC jsou výhodná licencovaná pásma, dobře chráněná před interferencemi; vhodná je volba:

pásmo L: 960 – 977 MHz (šířka 17 MHz)

pásmo C: 5 030 – 5 091 MHz šířka 617 MHz)

Pro CNPC se preferují primární linky CGS-UAV, s malou latencí přenosu. Ty však v kombinaci s rychlými drony na drahách LAP mohou být postihovány úniky a Dopplerovským posuvem frekvence; spolehlivost a robustnost přenosu pak mohou podstatně vylepšit sekundární družicové linky

Robust UAV radio modem for commercial and industrial drones

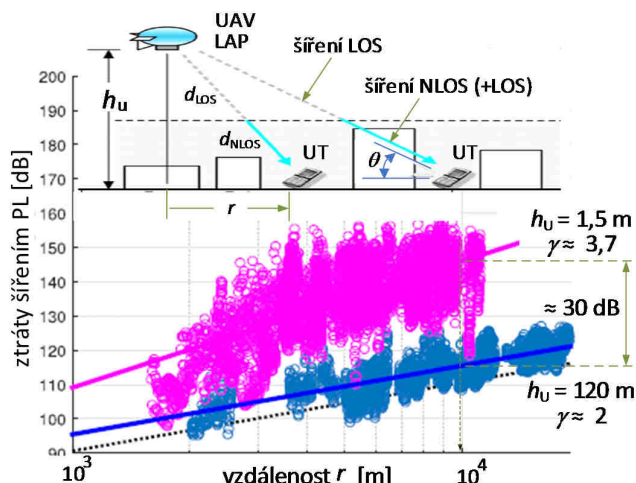
- **Range:** 5 km+ / 3.1 miles+ (LOS, uninterrupted conditions); for extended range, other solution available
- **Throughput:** Configurable up to 1.6 - 6 Mbps; for extended throughput, other solutions available
- **Network Topologies:** Point-to-Point, Point-to-Multipoint & Relay; multiple synchr. Point-to-Point Links
- **Modes of Operations:** Broadcast, Multicast, Unicast ; Unlimited number of ground units (receivers)
- **Sensitivity:** Max – 101dBm (for comparison GSM receiver has TCH/FS static sensitivity -104 dBm)
- **Diversity Support:** MIMO 2x2; Tx & Rx Diversity
- **Transmission Technology:** OFDM, TDD
- **FEC:** Turbo Code
- **Encryption:** 128 AES; 256 AES and custom export control (AES = Advanced Encryption Standard used to encrypt the RF communication)
- **Frequencies:** 2.4 GHz (ISM); 900 MHz & 5.8 GHz (ISM) – Optional (other frequen. options available)

New Drone Top Technology: <https://www.dronezon.com/learn-about-drones-quadcopters/what-is-drone-technology-or-how-does-drone-technology-work/>



Charakteristiky rádiových kanálů v komunikaci UAV

Ztráty šířením PL v rádiovém kanálu ATG



Pro určitou vzdálenost r se z více měření, které se realizují vždy po celé kružnici o poloměru r , získá celý soubor hodnot. Z nich se potom regresí (na bázi metody nejmenších čtverců) stanoví přímkové aproximace ztrát PL pro obě uvedené výšky.

V rádiovém kanálu ATG (Air to Ground) klesá průměrný přijímaný signál logaritmičticky se vzdáleností d vysílače Tx – přijímače Rx,

$$PL(\text{dB}) = PL(d_0) + 10\gamma \log(d/d_0),$$

kde γ je exponent ztrát PL a d_0 je vhodná referenční vzdálenost ležící v rozmezí 1 m až 1 000 m (často se volí $d_0 = 100$ m).

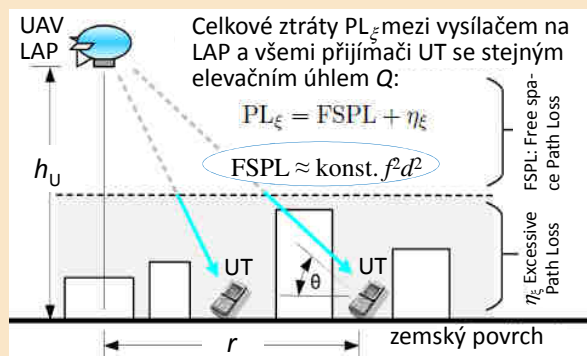
Graf vlevo uvádí výsledky měření ztrát PL mezi vysílačem Tx (UAV) a pozemním přijímačem Rx (UT), v závislosti na poloměru r kružnice opsané kolem průmětu Tx na zem, pro dvě výšky UAV: $h_u = 1,5$ m a $h_u = 120$ m.

Z grafu vyplývá, že exponent γ ztrát šířením PL - a tím i příslušné ztráty - výrazně klesají z hodnoty $\gamma = 3,7$ při výšce UAV $h_u = 1,5$ m, na $\gamma \approx 2,0$ při výšce $h_u = 120$ m, kdy se již těsně blíží ztrátám v ideálním kanálu LOS, kde $\gamma = 2,0$. Tuto výšku lze tedy považovat z hlediska ztrát za optimum. Při rostoucí výšce h_u se totiž výrazně zvětšuje podíl délky d_{LOS} se šířením LOS (s malým útlumem) vůči délce d_{NLOS} se šířením NLOS (s velkým útlumem). Tedy např. ve vzdálenosti $r = 10$ km daným zvětšením výšky h_u na 120 m klesnou ztráty PL o 30 dB!

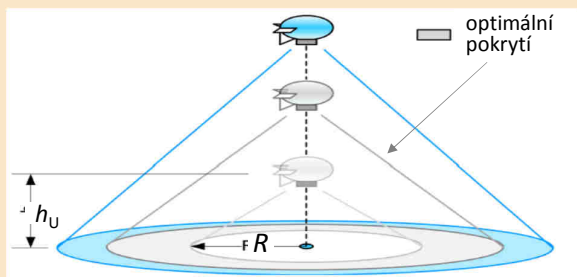
Pokud se ale výška UAV dále zvětšuje, ztráty PL opět narůstají, a to vlivem stále se zvětšující celkové délky rádiového kanálu mezi UAV a UT, kdy procentuální nárůst trasy LOS se zpomaluje.

Amorim, R.: Radio Channel Modelling for UAV. IEEE Wireless Communication Letters, August 20

Optimální výška platformy LAP pro maximální pokrytí na zemském povrchu



Zóny pokrytí pro platformy LAP s různou výškou h_u jsou určeny maximem ztrát šířením PL_{max} , které závisí na citlivosti přijímače, komunikační technice a cílové QoS



Al Hourani, et al.: Optimal LAP Altitude for Max. Coverage. IEEE Letters on Wir. Com., July 2014.

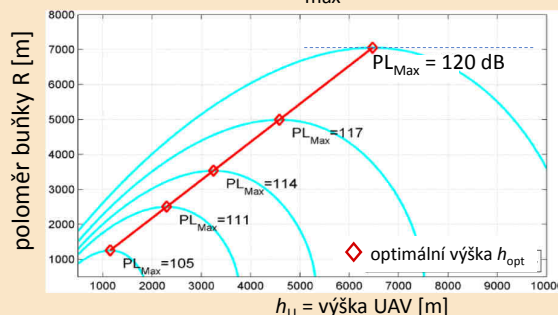
Pro určitý UAV na platformě LAP ($h < 10$ km) a jistou specifickou pozemskou lokalitu, existuje optimální výška h_{opt} , při níž je dosaženo maximálního pokrytí, při němž ztráty nepřesnou určitou hodnotu PL_{max} . Pokrytí je zajištěno v kruhové zóně (buňce) o poloměru R . Tuto zónu lze zvětšit připuštěním vyšších ztrát PL než je hodnota PL_{max} , avšak při náležitě změně radiokomunikační technologie (použitím modulací nižších řádů, účinnějších ochranných kódů, technik MIMO apod.) zajišťujících dodržení zvolené kvality služeb QoS. Pravděpodobnost ztrát $\mathcal{P}(\text{LOS})$ na lince LAP $\rightarrow$ UT:

$$\mathcal{P}(\text{LOS}) = \frac{1}{1 + \alpha \exp(-\beta [\frac{180}{\pi} \theta - \alpha])}$$

α : poměr zastavěné plochy k celkové ploše
 β : střední počet budov na jednotku plochy
 θ : elevační úhel UAV

Pravděpodobnost výskytu segmentu LOS roste s elevací θ a tedy i s výškou h_u . Je však závislá také na charakteru dané lokality, definované parametry α, β .

Poloměr buňky R v závislosti na výšce h_u UAV, pro rozdílné maximální přípustné ztráty PL_{max} [dB] v městském prostředí



Integrace buňkových sítí a prostředků UAV

Buňkové sítě 4G/5G podporující prostředky UAV
Prostředky UAV asistující buňkovým sítím 4G/5G

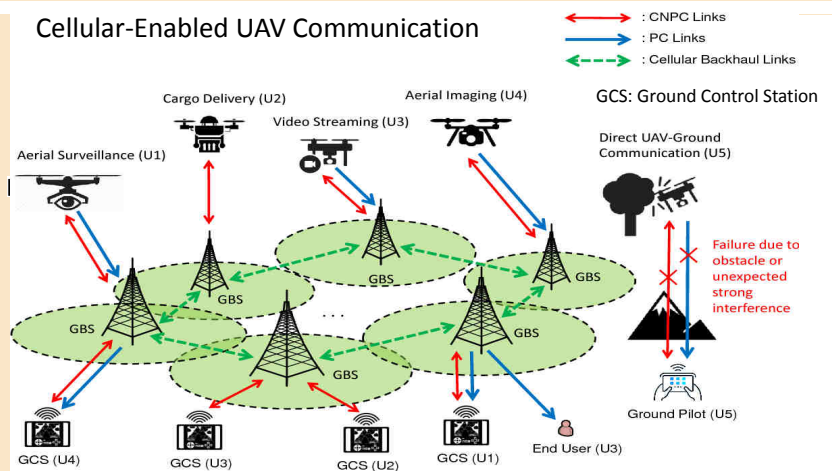
Integrace buňkových sítí a prostředků UAV

Nynější buňkové sítě jsou dvojrozměrné (2D), neboť základnové stanice BS, terminály UE i reléové uzly RN jsou na zemském povrchu. Prostředky UAV však umožňují implementovat též vzdušné stanice ABS (Air BS), vzdušné terminály AUE (Air UE) a vzdušné reléové uzly ARN (Air Relay Node), což umožňuje **přechod od sítí 2D na sítě 3D**, u nichž se značně zvyšuje kapacita, pokrytí a spolehlivost a naopak se snižuje latence.

Integrovaní buňkových sítí a prostředků UAV má v praxi dvě podoby, lišící se úlohou UAV v těchto technologiích (ve funkci prostředků UAV se nejčastěji používají drony, avšak uplatňují se zde i balony, vzducholodi a bezpilotní letadla):

- **Buňkové sítě 4G/5G podporující prostředky UAV** (CE UAV tj. cellular-enabled UAV): prostředky UAV se svými vlastními aktivitami (doručování zboží, video přehledování apod.) operují jako noví vzdušní uživatelé, kteří jsou ale podporováni stávajícími pozemními základnovými stanicemi GBS.
- **Prostředky UAV podporující buňkové sítě 4G/5G** (CC UAV tj. cellular-connected UAV): prostředky UAV operují jako nové vzdušné komunikační platformy (vzdušné základnové stanice ABS, vzdušné uživatelské terminály AUE, vzdušné reléové uzly ARN), sloužící pozemním uživatelům buňkových sítí.
- **Dron integrovaný do sítě 4G LTE** jako první ve světě demonstrovala na Mobilním světovém kongresu 2016 firma Intel.

Buňkové sítě 4G/5G sloužící prostředkům UAV



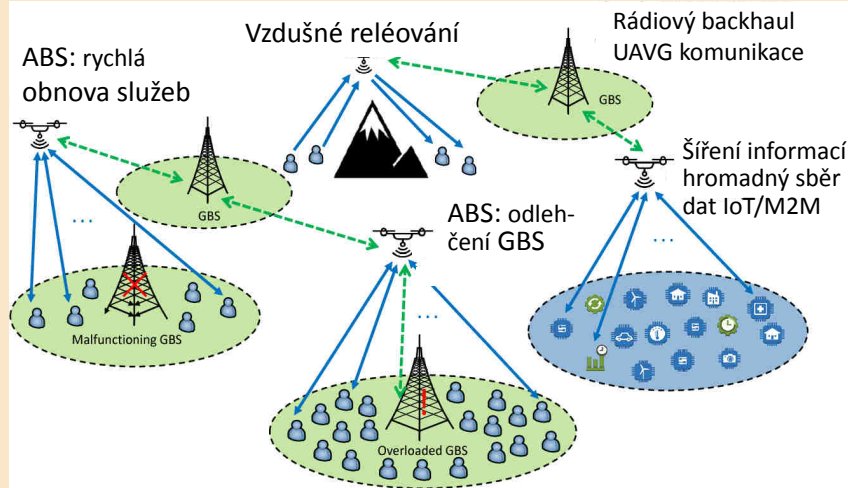
- V UAV komunikaci s podporou buňkové sítě CE UAV (Cellular Enabled UAV Communication) pozemní síť potlačuje řadu slabin klasické komunikace UAV.
- Potíže působí zejména přímé spojení UAV-GCS (Point to Point) v bezlicenčních pásmech ISM, kdy případná porucha funkce vlivem zastínění, nebo interferencí na trase AG, často vede k havárii UAV.
- Radikální zlepšení zde přináší kooperace UAV s buňkovou sítí 4G/5G, která může zvýšit spolehlivost linky UAV-GCS.

Prostředkům UAV přináší kooperace s buňkovou sítí ještě další atributy:

- Univerzální dosažitelnost: současné globální buňkové sítě 4G/5G umožní prostředkům UAV přístup téměř do libovolné světové lokality, v níž se již tyto sítě provozují.
- Urychlená inovace: buňkové sítě usnadní prostředkům UAV rychlé osvojení pokročilých technologií, jako jsou autentizační mechanismy, vyspělé technologie MIMO a zejména masivní MIMO apod.
- Snadné monitorování a management prostředků UAV.

Zhang S. et al.: Cellular-Enabled UAV Communication...arXiv:1805.07182v1 [cs.IT] 18 May 2018
Zeng Y. et al.: Cellular-Connected UAV: Potential, arXiv:1804.02217v1 [cs.IT] 6 Apr 2018

Prostředky UAV sloužící buňkovým sítím 4G/5G (CC UAV)



Technologie CC UAV (Cellular-connected UAV; UAV assisted cellular network): prostředky UAV pro různé aplikace jsou integrovány do buňkové sítě, kde potom mohou působit jako vzdušné základnové stanice ABS, nebo jako létající uživatelské terminály (AUE), anebo jako vzdušné radio-reléové uzly (ARN).

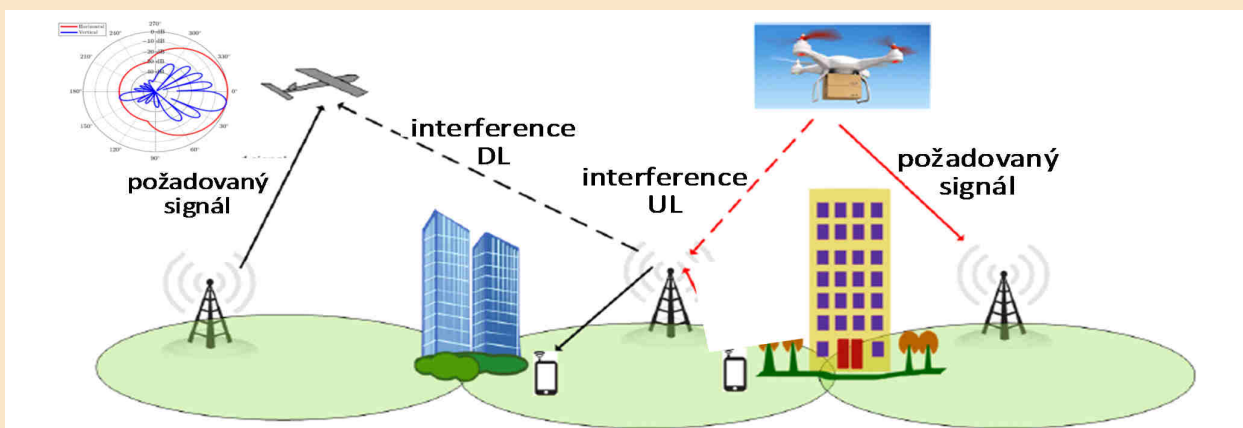
Tak vzniká nová generace trojrozměrných (3D) heterogenních rádiových sítí, ve které koexistují pozemní a vzdušní uživatelé.

Buňkovým sítím přináší kooperace s prostředky UAV tyto hlavní atributy:

- Prostředky UAV jsou schopné ve funkci vzdušné základnové stanice ABS zastoupit určitou pozemní základnovou stanici GBS při její poruše, nebo ji mohou dočasně podpořit při jejím přetížení, a to při nízkých investicích CAPEX
- Vzdušný uživatelský terminál AUE je možné využít jako vzdušnou kameru
- Z více kamerových dronů lze vytvořit roj, který při aplikaci techniky M-MIMO vykazuje vysokou účinnost SE
- Vzdušné relé pomáhá vykrýt zastíněné úseky pozemní sítě, anebo rozšířit její pokrytí za dosavadní hranice.
- UAV také mohou pomoci při šíření hromadných informací mnoha uživatelům, nebo při hromadném sběru dat.

Zhang S. et al.: Cellular-Enabled UAV Communication...arXiv:1805.07182v1 [cs.IT] 18 May 2018
Zeng Y. et al.: Cellular-Connected UAV: Potential, arXiv:1804.02217v1 [cs.IT] 6 Apr 2018

Interference v buňkových sítích podporujících prostředky UAV



Problém výrazných interferencí v systémech CC-UAV

- S rostoucí výškou UAV jsou interference zvyšovány dominantním kanálem UAV-GBS
- Vzájemnými interferencemi jsou ohroženy také trasy UAV-UAV
- Interference vznikají rovněž mezi UAV a pozemními uživateli
- Při komunikaci na trase ABS-UAV (DL) může vlivem silného kanálu LOS každý UAV přijímat silné interference od více sousedních BS k nimž nenáleží; proto má tato trasa horší parametry.
- Při komunikaci na trase UAV- ABS (UL) prostředek UAV také vyvolává silné interference ve více sousedních ABS, k nimž nenáleží.

Zhang S. et al.: Cellular-Enabled UAV Communication...arXiv:1805.07182v1 [cs.IT] 18 May 2018
Zeng Y. et al.: Cellular-Connected UAV: Potential, arXiv:1804.02217v1 [cs.IT] 6 Apr 2018

Optimální letová trasa prostředků UAV

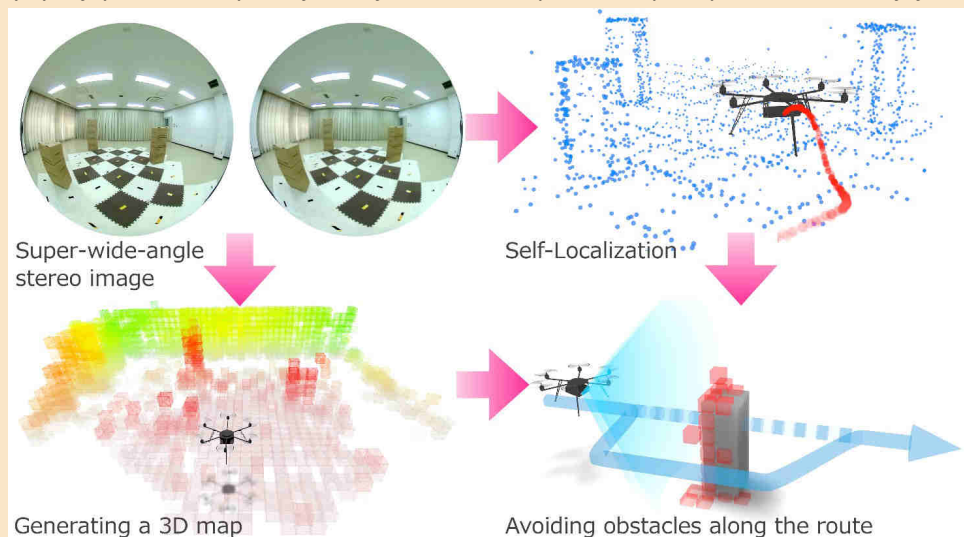
Různé způsoby řízení letu dronu

- Let UAV a zejména dronů v různých profesionálních i amatérských aplikacích užívá **ruční řízení**, na základě jeho vizuálního sledování,
- Velkou podporu zde může často poskytnout **družicová navigace** GNSS (Global Navigation Satellite Systems), konkrétně systémy GPS, Galileo, Glonass a BeiDou).
- Při navigaci dronů se uplatňují i pokročilé **systémy mobilní buňkové komunikace** všech vývojových generací tj. GSM/2G, UMTS/3G, LTE/4G a budoucí 5G.
- Avšak v určitých lokalitách, například pod mosty, v tunelech, uvnitř budov apod., je signál GPS nestabilní, nebo nedosažitelný. V této situaci hrozí dronům nebezpečí kolísí. Potom lze využít pro navigaci také **klasické inerciální systémy** [1].
- Drony mohou létat také **autonomně**, s využitím zabudovaného softwarově řízeného letového plánu, kooperujícího s palubními senzory, ovšem opět s rizikem kolísí.
- K jeho odstranění lze aplikovat **antikolizní systémy SAA** (sense and avoid). Jedna z jeho verzí využívá ke snímání okolního prostředí stereokamery s ultraširokým záběrem (Ricoh SV-M-S1) určená pro 3D měření. Ty mohou generovat v reálném čase digitální 3D mapu prostoru v okolí plánované letové trasy dronu a v ní lokalizovat jeho okamžitou polohu. Na základě těchto dvou údajů je dron schopen vyhnout se případným překážkám a dále pokračovat v plánované trase letu.

[1] Diplomová práce E. Doskočil: Zařízení pro inerciální navigaci. FEL Praha, 2008

Automatický let dronů a obcházení překážek, využívající 3D vision system

Let dronu bývá často řízen ručně, pomocí vizuálního sledování, velkou podporu může poskytovat družicová navigace GPS. Avšak selžou - li tyto prostředky, hrozí dronu nebezpečí kolísí s jinými objekty. Situaci pak řeší autonomní systémy pro let a obcházení překážek, které kombinují signál z 3D ultraširokoúhlé stereokamery (Ricoh SV-M-S1) s výstupy systémů pro inerciální navigaci, vybavené IMU senzory. Ty měří pomocí akcelerometrů a gyroskopů pohyb objektů v třírozměrném prostoru. Z těchto dat vytvářejí digitální mapu trasy letu, v ní lokalizují vlastní dron a korigují jeho trasu tak, aby nedocházelo ke kolísím. Přitom se vyhýbají překážkám po nejrůznějších trasách (přeletem přes překážku, nebo jejím obklopením apod.).



Autonomous flight and obstacle avoidance of drones based on 3D vision... https://www.ricoh.com/technology/institute/research/tech_flight_by_3d_vision.html

Interference-aware path planning for cellular-connected UAVs over 5G

Novel interference-aware **path planning scheme** that allows 5G cellular-connected UAVs to **minimize the interference** they cause on a ground network as well as their **wireless transmission latency** while transmitting online mission-related data

associated with BS s at location a . Next, we present our optimization problem whose goal is to determine the path of each UAV along with its cell association vector and its transmit power level at each location a along its path p_j :

$$\min_{\hat{P}, \alpha, \beta} \vartheta \sum_{j=1}^J \sum_{s=1}^S \sum_{c=1}^{C_{j,s}} \sum_{a=1}^A \sum_{r=1, r \neq s}^S \frac{\hat{P}_{j,s,a} h_{j,r,c,a}}{C_{j,s}} + \varpi \sum_{j=1}^J \sum_{a=1}^A \sum_{b=1, b \neq a}^A \alpha_{j,a,b} + \phi \sum_{j=1}^J \sum_{s=1}^S \sum_{a=1}^A \beta_{j,s,a} \tau_{j,s,a}, \quad (6)$$

$$\sum_{b=1, b \neq a}^A \alpha_{j,b,a} \leq 1 \quad \forall j \in \mathcal{J}, a \in \mathcal{A}, \quad (7)$$

$$\sum_{a=1, a \neq o_j}^A \alpha_{j,o_j,a} = 1 \quad \forall j \in \mathcal{J}, \quad \sum_{a=1, a \neq d_j}^A \alpha_{j,a,d_j} = 1 \quad \forall j \in \mathcal{J}, \quad (8)$$

$$\sum_{a=1, a \neq b}^A \alpha_{j,a,b} - \sum_{f=1, f \neq b}^A \alpha_{j,b,f} = 0 \quad \forall j \in \mathcal{J}, b \in \mathcal{A} (b \neq o_j, b \neq d_j), \quad (9)$$

$$\hat{P}_{j,s,a} \geq \sum_{b=1, b \neq a}^A \alpha_{j,b,a} \quad \forall j \in \mathcal{J}, s \in \mathcal{S}, a \in \mathcal{A}, \quad (10)$$

$$\hat{P}_{j,s,a} \geq \beta_{j,s,a} \quad \forall j \in \mathcal{J}, s \in \mathcal{S}, a \in \mathcal{A}, \quad (11)$$

$$\sum_{s=1}^S \beta_{j,s,a} - \sum_{b=1, b \neq a}^A \alpha_{j,b,a} = 0 \quad \forall j \in \mathcal{J}, a \in \mathcal{A}, \quad (12)$$

$$\sum_{c=1}^{C_{j,s}} \Gamma_{j,s,c,a} \geq \beta_{j,s,a} \bar{\Gamma}_j \quad \forall j \in \mathcal{J}, s \in \mathcal{S}, a \in \mathcal{A}, \quad (13)$$

$$0 \leq \hat{P}_{j,s,a} \leq \bar{P}_j \quad \forall j \in \mathcal{J}, s \in \mathcal{S}, a \in \mathcal{A}, \quad (14)$$

$$\alpha_{j,a,b} \in \{0,1\}, \beta_{j,s,a} \in \{0,1\} \quad \forall j \in \mathcal{J}, s \in \mathcal{S}, a, b \in \mathcal{A}. \quad (15)$$

arXiv:1801.05500v1 [cs.IT] 16 Jan 2018

Massive MIMO for Communications with Drone Swarms

III. ACHIEVABLE RATE ANALYSIS

In this section, we derive the uplink achievable rate for MRC receiver considering the estimated CSI Proof of Equation (49): By letting

2) Proof of Equation (50):

$$\begin{aligned} & \mathbb{E} \left\{ e^{i \frac{2\pi}{\lambda} ((p-p')\delta_x \sin \theta_k \cos \phi_k + (q-q')\delta_y \sin \theta_k \sin \phi_k)} \right\} \\ &= \int_0^{2\pi} \int_0^\pi e^{i \frac{2\pi}{\lambda} ((p-p')\delta_x \sin \theta \cos \phi + (q-q')\delta_y \sin \theta \sin \phi)} \\ & \quad \times f_{\theta_k}(\theta) f_{\phi_k}(\phi) d\theta d\phi \\ &= \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi e^{i \frac{2\pi}{\lambda} ((p-p')\delta_x \sin \theta \cos \phi + (q-q')\delta_y \sin \theta \sin \phi)} \sin \theta d\theta d\phi. \end{aligned}$$

By letting $\alpha_1 = \frac{(p-p')\delta_x}{\lambda}$ and $\alpha_2 = \frac{(q-q')\delta_y}{\lambda}$, the above integral can be rewritten as

$$\frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi e^{i2\pi(\alpha_1 \sin x \cos y + \alpha_2 \sin x \sin y)} \sin x dx dy.$$

First we observe that $\alpha_1 \cos y + \alpha_2 \sin y = \sqrt{\alpha_1^2 + \alpha_2^2} \left(\frac{\alpha_1}{\sqrt{\alpha_1^2 + \alpha_2^2}} \cos y + \frac{\alpha_2}{\sqrt{\alpha_1^2 + \alpha_2^2}} \sin y \right)$ and we can find an angle $\xi \in [0, 2\pi)$, such that $\cos \xi = \frac{\alpha_1}{\sqrt{\alpha_1^2 + \alpha_2^2}}$ and $\sin \xi = \frac{\alpha_2}{\sqrt{\alpha_1^2 + \alpha_2^2}}$. Thus we can simplify the expression as

and using (80), we get

$$\begin{aligned} & \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi e^{i2\pi \alpha \sin x \cos y} \sin x dx dy = \frac{1}{\pi} (h(\alpha) + h^*(\alpha)) \\ &= \frac{2}{\pi} \Re\{h(\alpha)\}. \quad (81) \end{aligned}$$

We calculate the Fourier transform of $h(\alpha)$ as

$$\begin{aligned} H(f) &= \mathcal{F}\{h(\alpha)\} = \int_{-\infty}^{\infty} h(\alpha) e^{-i2\pi \alpha f} d\alpha \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^\pi \int_0^{2\pi} e^{i2\pi \alpha \sin x \cos y} \sin x dx dy e^{-i2\pi \alpha f} d\alpha \\ &= \int_0^\pi \int_0^{2\pi} \left(\int_{-\infty}^{\infty} e^{-i2\pi \alpha (f - \sin x \cos y)} d\alpha \right) \sin x dx dy \\ &= \int_0^\pi \int_0^{2\pi} \delta(f - \sin x \cos y) \sin x dx dy \quad (82) \\ &= \begin{cases} \int_0^\pi \int_0^{2\pi} \delta(f - \sin x \cos y) \sin x dx dy, & \text{if } f \in [0, 1], \\ 0, & \text{if } f \notin [0, 1]. \end{cases} \end{aligned}$$

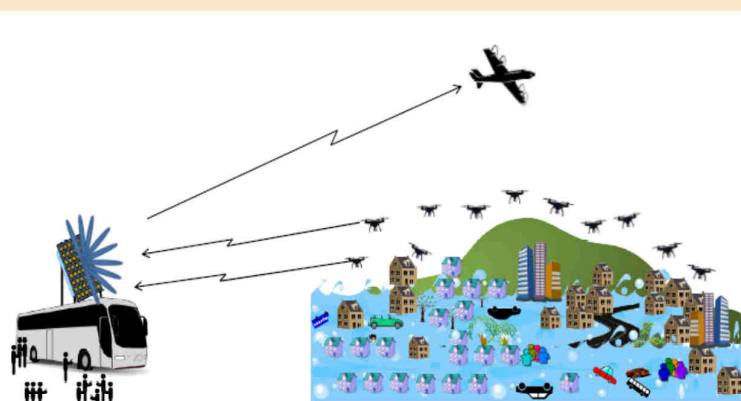
Here we used the facts that $\sin x \cos y \in [0, 1]$ when $x, y \in [0, \frac{\pi}{2}]$ and that

$$\int_A f(x) \delta(g(x)) dx = \sum_i \frac{f(x_i)}{|g'(x_i)|}, \quad (83)$$

Technika M-MIMO v komunikaci UAV

„Win Win Technology“

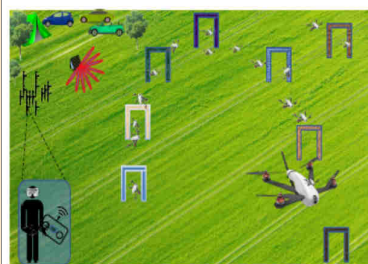
Aplikace techniky massive-MIMO v komunikaci UAV



Katastrofický management při masívních záplavách



Videostreaming: sportovním utkání



Venkovní závody dronů

Velmi účinná podpora managementu krizových situací

Při přírodních katastrofách (povodně apod.) může roj dronů, spojených s jedinou pozemní řídicí stanicí GBS typu m-MIMO, mapovat záchranné práce. Drony poskytují záběry ohrožených osob a předmětů v reálném čase a předávají je v HD kvalitě a s latencí pod 10 ms ke stanici GBS/m-MIMO. Tím se značně usnadní činnost záchranářů. Multiplexní schopnosti technologie m-MIMO vedou k mohutnému navýšení přenosové kapacity systému. Např. k přenosu komprimovaného videa od celkem 20 dronů s rozlišením 4k, je nutná sumární kapacita 1,46 Gbit/s, které se dosáhne v pásmu 20 MHz se systémem m-MIMO vybaveným cca 300 anténami; každý dron pak vystačí s jedinou anténou. Nachází-li se celý systém v prostředí LOS, je uvedený přenos videa navíc i velice spolehlivý.

Kontinuální přenos videa v reálném čase (videostreaming)

Při velkých sportovních utkáních může 20 i více kamer (4k/360°) snímat akce hráčů a přenášet je k přístupovému bodu AP. To přináší divákům virtuální realitu akcí všech hráčů.

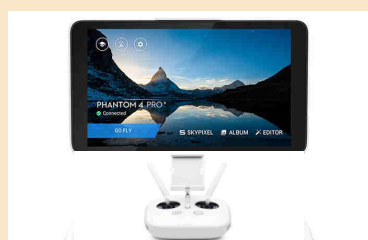
Závody dronů – sport budoucnosti

Skutečný pilot řídí svůj RC dron při průletu brankami dálkově technikou RPV, tj. s využitím palubní kamery a s následným rychlým přenosem signálů do přístupového bodu AP.

...IEEE Trans. on Wireless Com., 2017. Published 2017 in ArXiv

Aplikace rádiové komunikace s podporou UAV

Kvadroptéra DJI Phantom 4 Pro Plus V2.0 - DJI0432 („létající kamera“)



Inteligentní dálkový ovladač využívá systém Lightbridge pro přenos HD obrazu s **podporou přenosové frekvence 5,8 GHz a 2,4 GHz**, díky čemuž se minimalizuje riziko rušení přenosu signálu. Po zapnutí DJI Phantom 4 Pro je automaticky zhodnocena úroveň okolního rušení a na základě toho zvolí přenosovou frekvenci. I díky této funkci je možné v ideálních podmínkách dosáhnout přenosu videa až na 7 km

Kvadroptéra vybavená 4K Ultra HD kamerou, video pozičním systémem a anti-kolizními čidly. Kamera je osazena 1-palcovým 20-megapixelovým CMOS snímačem, který je schopný natáčet 4K/60fps video a pořizovat sekvenční fotografie při 14 snímcích za vteřinu. Systém FlightAutonomy doplňuje dvojici zadních obrazových čidel a infra senzory, Phantom 4 Pro vnímá okolí v pěti směrech a vyhýbá se překážkám ve 4 směrech. Maximální rychlost letu je 20 m/s a max. dobu letu 30 min. Hlavní režimy dronu:

Draw: nová technika pro zadávání trasy. Ta se nakreslí na obrazovce a dron poletí daným směrem a v dané výšce.

ActiveTrack: dron automaticky rozezná předměty, které obsluha zvolí a označí, následuje je a natáčí je v pohybu (viz follow me/you/subject: <https://www.dronezon.com/drone-reviews/best-follow-me-gps-mode-drone-technology-reviewed>)

TapFly: poklepem na zvoleném poli obrazovky lze nastavit směr letu, s automatickým vyhýbáním se překážkám

Návrat domů. dron automaticky vybírá nejlepší trasu pro návrat domů a event. ji přizpůsobuje okolním podmínkám

Vertikální start a přistání VTOL (vertical take-off and landing): tento režim zvládá většina dronů, i když není triviální

Režim gest: umožňuje snadno pořizovat „selfie“ za pomoci jednoduchých gest, bez dálkového ovládání.

Tři letové módy: P = Poziční (TapFly, ActiveTrack); A = ATTI tj. Attitude mode (vypnuta stabilizace pomocí satelitů, udržuje se výška, ale nekompensuje vodorovný drift); S = sport (poskytuje extra hbitost a vyšší rychlost až 72km/h)

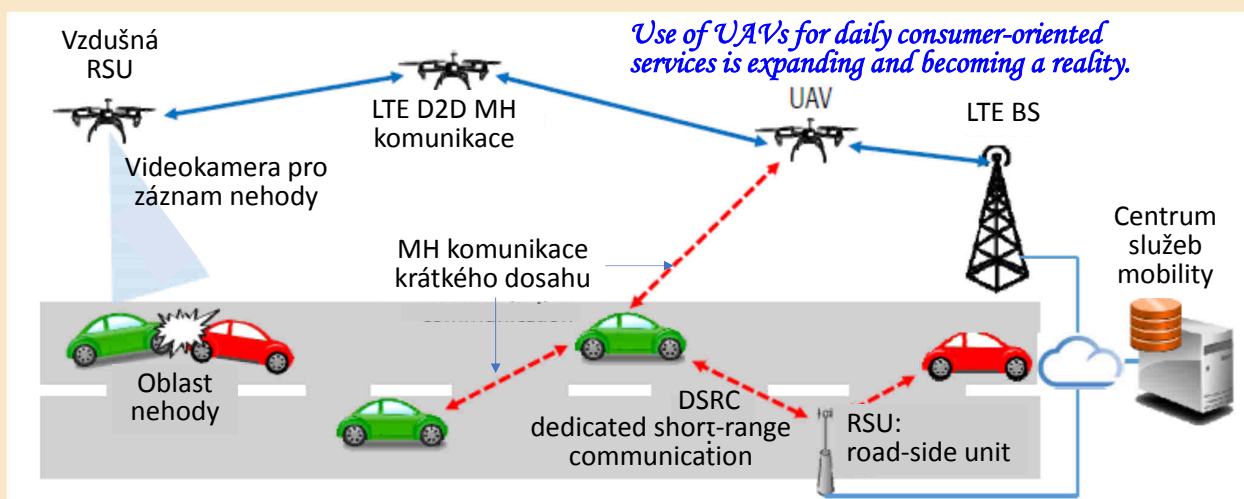
Záložní senzory: dron je vybaven dvojicí kompasů a IMU jednotek

DJI GO 4: aplikace poskytující živý náhled, údaje o letu a pokročilé nastavení, ovládaná přes mobilní zařízení

Zpracování videa: podporuje H.264 4K videa při 60fps, nebo H.265 4K při 30fps, obojí s datovým tokem 100 Mb/s.

Video pilotování (video piloting) (také **First-person view (FPV)**, nebo **remote-person view (RPV)** je metoda ovládání rádiem kontrolovaných dopravních prostředků z pohledu virtuálního řidiče nebo pilota nacházejícího se v tomto prostředí

UAV prostředky podporující inteligentní dopravní systém ITS



Prostředky UAV lze využít v inteligentních dopravních systémech ITS (intelligent transportation systems) ve funkci:

- Vzdušných silničních jednotek RSU (road-side unit), umožňujících komunikaci centra MSC s automobily
- Nosičů videokamer pro záznam havarijních situací a jeho on-line přenosu do MSC (mobile services center)
- Jeden z prostředků UAV se může přiblížit k místu nehody, pořádit její videozáznam, poté přistát a odeslat toto video prostřednictvím jiných UAV – event. technikou mnohaskokové komunikace MH D2D (multihop device to device), buď do centra MSC, nebo do základnové stanice LTE BS a odtud do dalších relevantních entit.

Menouar H. et al.: UAV-Enabled Intelligent Transportation Systems for Smart Cities. IEEE Com. Magazine, Mart 2017.

Precizní zemědělství



Pozemní kontrolní stanice pro řízení UAV



Automatický kontrolní letový systém pro UAV

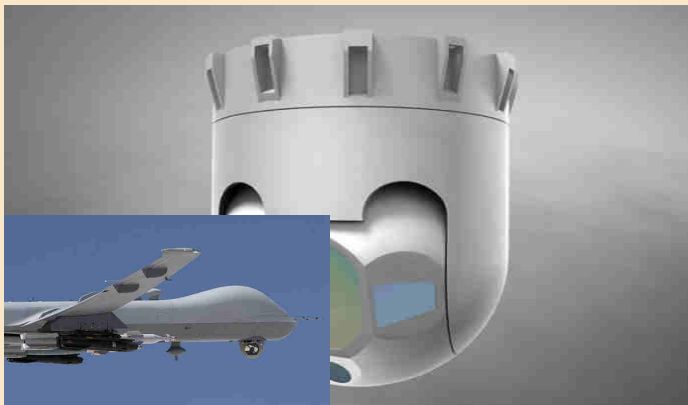


Ochrana proti nebezpečným dronům

Prostředky ochrany proti vojenským UAV I

Raytheon's **Multi-Spectral Targeting System** (MTS) is a multi-use infrared, EO, and laser detecting-ranging-tracking set, integrated in a single sensor package. MTS is suited for long-range surveillance, target acquisition, tracking, range finding and laser designation. This MTS system can be coupled with **Directed high power microwave (HPM) beam system** operating from a fixed point, or with a **High Energy Laser (HEL)** installed on dune buggy,

Multispectral targeting sensors for unman. aerial vehicles



A promising way to combat autonomous flying machines (drones /UAV) is by using directed energy weapons. Very strong fire beams that travel at the speed of light, can flick from target to target in a fraction of a second, and renders them unable to fly.

Raytheon directed high power microwave (HPM) beam system is one example of these directed energy weapon (DEW) technology, which is of increasing interest

High power microwave (HPM) beam system



Prostředky ochrany proti vojenským UAV II

MTS target. system and high energy laser (HEL)

Raytheon's **sophisticated MTS sensor package, combined with a high-energy laser (HEL)** and mounted on the MRZR vehicle (dune buggy), could offer an effective defense against drone weapons. The HEL system onboard the MRZR delivers four hours of intelligence, surveillance and reconnaissance capability and 20 to 30 laser shots. The system can also be coupled with a generator to provide virtually infinite magazine depth.

Polaris MRZR 4 Off-Road Vehicle



The REX-1 electromagnetic gun „Kalashnikov“

REX 1 handheld elmag gun REX-1 is designed to target a UAV/drone's and **forcing it to land** from a hovering position. It is designed to halt the location functions of a UAV by **paralyzing important geolocating systems**, specifically GPS, GLONASS Galileo and BeiDou. Expanding upon its specifications, the device can **block various mobile signals** as WiFi, GSM, 3G, LTE (at 900 MHz, 2.4 GHz and 5.2-5.8 GHz bands). REX-1 range is one km. The civilian version of REX-1 could cost around \$5,000

Handheld electromagnetic gun REX-1



Výzvy ve vývoji prostředků pro komunikaci UAV

Research Directions	Challenges and Open Problems
Channel Modeling	• Air-to-ground path loss. • Air-to-air channel modeling. • Small scale fading.
Deployment	• Deployment in presence of terrestrial networks. • Energy-aware deployment. • Joint 3D deployment and resource allocation.
Performance Analysis	• Analyzing heterogeneous aerial-terrestrial networks. • Performance analysis under mobility considerations. • Capturing spatial and temporal correlations.
Cellular Network Planning with UAVs	• Backhaul-aware cell planning. • Optimizing number of UAVs. • Traffic-based cell association. • Analysis of signaling and overhead.
Resource Management and Energy Efficiency	• Bandwidth and flight time optimization. • Joint trajectory and transmit power optimization. • Spectrum sharing with cellular networks. • Multi-dimensional resource management.
Trajectory Optimization	• Energy-efficient trajectory optimization. • Joint trajectory and delay optimization. • Reliable communication with path planning.
Cellular Connected UAV-UEs	• Low latency control. • Interference management. • Handover management. • Ground-to-air channel modeling. • Ultra reliable, low latency communications.

Otevřené problémy a výzvy radiokomunikace podporované prostředky UAV

- Modelování kanálů vzduch – vzduch (A – A) v komunikaci UAV
- Mnohocestné šíření a malosignálový únik v komunikaci UAV
- Prohloubení analýzy heterogenních sítí země - vzduch
- Časová a prostorová korelace v komunikaci UAV
- Využití komunikace UAV v rádiovém backhau a fronthau
- Optimalizace počtu prostředků UAV v konkrétních aplikacích
- Optimalizace šířky pásma a doby letu komunikačních prostředků UAV
- Sdílení spektra mezi buňkovými sítěmi a sítěmi UAV
- Všestranný interferenční management
- Management předávání v heterogenních sítích země - vzduch
- Ultraspolehlivá a nízkolatenční komunikace (URLLC) v systémech UAV
- Internet věí IoT a komunikace M2M v sítích UAV
- Technologie MIMO a M-MIMO v komunikaci UAV
- Management dronů vytvářejících letku (swarm)

Děkuji za pozornost!

Václav Žalud

Thank you very much!

