

Vzdušné prúdenie a letové výkony pomaly letiacich vzdušných prostriedkov

Ing. Peter KANDRÁČ, Ing. Matej ANTOŠKO

Letecká fakulta Technickej univerzity v Košiciach, Katedra letovej prípravy

Abstract: Article discusses the slow-flying aerial vehicles and the impact of wind on their flight performance (action radius).

I. Úvod

Malé bezpilotné lietajúce prostriedky (UAV), prešli v poslednej dobe značným vývojom. Stále si nachádzajú nové formy využitia v civilnom i vojenskom letectve. Je ale nutné poznamenať, že UAV operujú v malých rýchlostiach, preto pri ich používaní treba zohľadňovať množstvo faktorov ovplyvňujúcich ich let. V tomto článku sa budeme venovať vplyvu vetra a s ním spojeného akčného rádia, keďže vietor je prítomný vo všetkých vrstvách atmosféry.

II. Definície

Vietor možno definovať ako horizontálnu zložku pohybu vzduchových hmôt v dôsledku nerovnomerného rozdelenia teploty a tlaku na rozličných miestach zemského povrchu. V meteorológii je definovaný uhlom, ktorý zvierá magnetický sever a azimutom odkiaľ vietor vane a rýchlosťou, ktorá určuje dráhu prekonanú jednotkovým objemom vzduchu za jednotku času.

Rýchlosť vetra sa klasifikuje buď presným určením jeho rýchlosti (km/h, m/s, kts), alebo v stupňoch, ktoré sa určujú odhadom podľa Beaufortovej stupnice. Rýchlosť vetra sa v čase výrazne mení, preto sa často udáva priemerná hodnota za určité obdobie napr. 1 minúta alebo 5 minút. Pre ďalšie úvahy budeme uvažovať o rýchlosti vetra v základných jednotkách SI.

Smer vetra sa udáva podľa smeru odkiaľ vietor fúka a to buď presne pomocou azimutu (0° - 360°), alebo pomocou svetových strán spravidla s presnosťou na šestnástiny ($22,5^{\circ}$ - S, SSV, SV, VSV, V...).

Pravá vzdušná rýchlosť (TAS) je rýchlosť, ktorou sa lietadlo pohybuje voči vzduchu veľmi. Nie je jednoduché ju merať, ale je možné ju vypočítať na základe indikovanej vzdušnej rýchlosti, barometrického tlaku a teploty vzduchu. Pravá vzdušná rýchlosť sa v malých nadmorských výškach prakticky zhoduje s indikovanou vzdušnou rýchlosťou. S výškou však rozdiel celkom zásadne rastie (TAS je vždy väčšia ako IAS).

Indikovaná vzdušná rýchlosť (IAS) sa na rozdiel od TAS meria relatívne ľahko – ako funkcia dynamického tlaku pôsobiaceho na snímač umiestnený v lietadle v ose letu. Práve túto rýchlosť ukazujú prístroje v kabíne lietadla. Vďaka rôznej hustote vzduchu v rôznych výškach je táto rýchlosť iba zdanlivá, vyjadrujúca aerodynamické sily pôsobiace na lietadlo. Lietadlo pohybujúce sa stále rovnakou rýchlosťou TAS bude mať vo väčšej výške, vzhľadom na redší vzduch, nižšiu IAS než na zemi, alebo naopak, lietadlo letiace rovnakou IAS bude mať s rastúcou výškou vyššiu TAS.

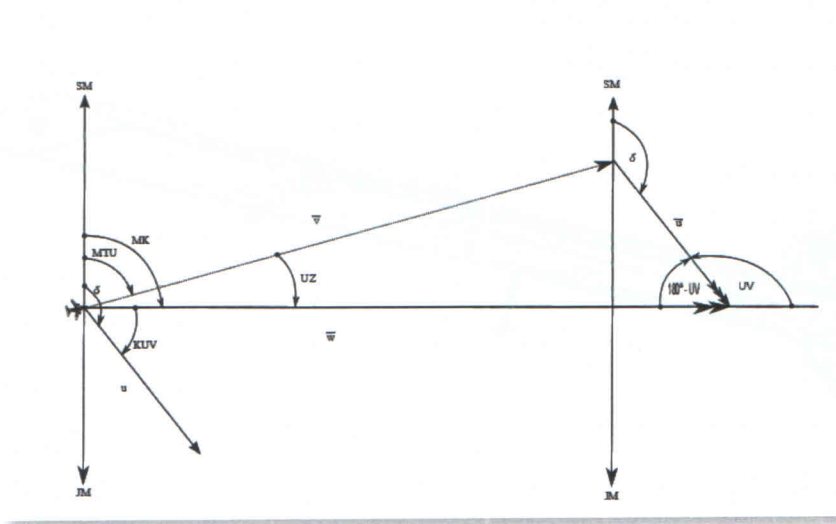
Traťová rýchlosť (GS) je rýchlosť, ktorou sa lietadlo pohybuje voči zemi. Je to TAS opravená o vplyv vetra.

Uhol znosu je uhlový rozdiel medzi kurzom lietadla a plánovanou traťou. Uhol znosu sa meria v stupňoch a to od smeru, ktorým smeruje pozdĺžna os lietadla po traťový uhol.

III. Základné navigačné prvky

Navigačný trojuholník rýchlostí (NTR)

NTR vyjadruje vektorový súčet TAS a rýchlosti vetra v horizontálnej rovine. Používa sa pre výpočty základných navigačných prvkov ako je traťová rýchlosť a potrebný kurz. Základné prvky sú popísané v obrázku 1.



Obr. 1 Navigačný trojuholník rýchlostí

MTU	Magnetický traťový uhol
UZ	Uhol znosu
δ	Smer vetra
KUV	Kurzový uhol vetra
V	Vzdušná rýchlosť v km/h
u	Rýchlosť vetra
W	Traťová rýchlosť v km/h
UV	Uhol vetra na trať
JM	Juh magnetický
SM	Sever magnetický
MK	Magnetický kurz

Výpočet uhla znosu a traťovej rýchlosti zo známeho vektora vetra:

$$UZ = \arcsin\left(\frac{U}{V} * \sin UV\right) \quad (1)$$

$$W = \frac{\sin(UV + UZ)}{\sin UV} * V \quad (2)$$

Akčný rádius leteckých prostriedkov

Drvivá väčšina letov komerčného dopravného letectva, má charakter traťového letu, teda letu z bodu A do bodu B jedným smerom. Pre takýto let je vplyv vetra ambivalentný, podľa toho, ako koreluje s danou traťou, môže teda byť jednoznačne záporný pri čelnom protivetre, alebo jednoznačne kladný pri presnom chrbtovom vetre. Na transatlantických tratiach spôsobuje trvalé výškové západné prúdenie to, že let západným smerom z Európy do Severnej Ameriky (proti vetru) je zhruba o hodinu dlhší, než let opačným smerom. Veľkosť vplyvu závisí od uhla vetra na trať a tiež od pomeru vzdušnej rýchlosti lietadla a rýchlosti vetra. Je zaujímavé, že v praxi sa často udržuje mylný názor, že tzv. kolmý vietor, teda vietor vanúci kolmo na trať, nemá na traťovú rýchlosť žiadny vplyv. Nie je to tak, aj vietor kolmý na trať znižuje traťovú rýchlosť, pretože časť vzdušnej rýchlosti sa musí využiť na elimináciu znosu. Z hľadiska dosiahnutej traťovej rýchlosti je neutrálny taký vietor, ktorý vanie mierne od chrbta (uhol vetra 90° a viac), takže jeho traťová zložka kompenzuje stratu rýchlosti použité na elimináciu znosu spôsobeného na trať kolmou zložkou. Veľkosť chrbtovej zložky závisí od pomeru vzdušnej rýchlosti a rýchlosti vetra. Extrém tejto závislosti je pri pomere 1:1, kedy má navigačný trojuholník rýchlostí tvar

rovnoramenného trojuholníka, čo zodpovedá uhlu vetra na trať rovnému 120° , pre všetky menšie pomery sa pohybuje v rozmedzí 90° až 120° .

Pre ľahké bezpilotné prostriedky (UAV) je však typický iný charakter letu, ide o tzv. let s návratom, teda let prebieha nie len jedným smerom, ale dvomi spravidla opačnými smermi, prípadne po uzavretej viacuholníkovej trati. Typické využitie týchto prostriedkov je prieskum daného vzdialeného objektu/objektov a návrat na miesto štartu, alebo hliadkovanie nad daným objektom po určitú dobu a potom návrat. Pre takéto misie je veľmi dôležitým parametrom **akčný rádius** (AR) vzdušného prostriedku.

Akčný polomer (rádius) je definovaný ako „Vzdialenosť, do ktorej môže lietadlo doletieť s vlastnou zásobou pohonných látok pri daných podmienkach a vrátiť sa na miesto odletu.“[2]

V podmienkach atmosféry bez vetra je akčný rádius daný jednoducho polovicou súčinu vzdušnej rýchlosti a maximálnou vytrvalosťou, bez uvažovania doby strávenej nad cieľovým objektom.

$$AR = \frac{D * \bar{v}}{2} \quad (3)$$

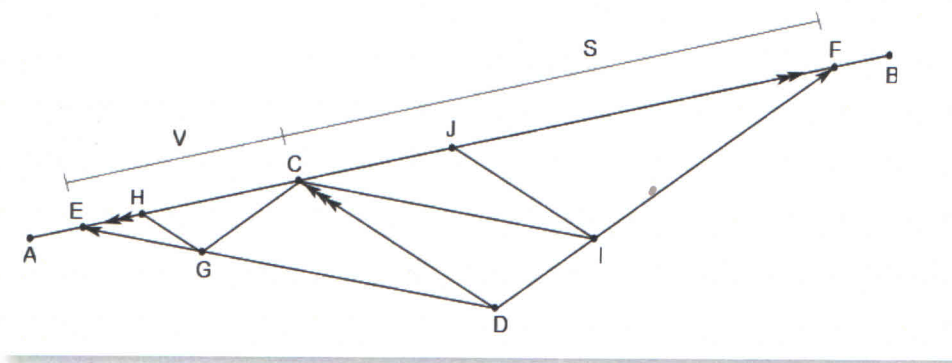
AR	akčný rádius v km
D	max. doba letu s daným palivom v hod.
$\bar{v}$	Vzdušná rýchlosť v km/h

To je len teoretická možnosť, v praxi je vždy požadované stráviť v cieľovej oblasti nejaký čas, prípadne navštíviť viac cieľových oblastí. Tento čas strávený nad cieľom/mi, alebo čas zatačky na spätný kurz (dôležité pri letoch vysokými rýchlosťami) je potom potrebné od celkovej vytrvalosti a pre let tam a späť uvažovať len s takto zníženou vytrvalosťou pri danom režime letu. Na rozdiel od traťového letu, kde má vietor možnosť vplývať kladne aj záporne, je pri lete s návratom akýkoľvek vietor vždy záporným faktorom, teda akýkoľvek stály vietor vždy znižuje akčný rádius.

Na prvý pohľad by mala byť strata traťovej rýchlosti pri lete proti vetru kompenzovaná ziskom traťovej rýchlosti pri spiatočnom lete po vetre. To je síce zrejma pravda, ale pri rovnakej dĺžke trate letu je časové pôsobenie vetra rôzne dlhé. Záporné pôsobenie trvá dlhšie než kladné a preto spôsobuje zníženie akčného rádia.

Pre výpočty AR je potrebné vypočítať dve traťové rýchlosti, rýchlosť „von“ (V) a rýchlosť „späť“ (S). Tieto rýchlosti sa dajú určiť buď graficky, alebo výpočtom podľa vzorca(2). Je potrebné

poznamenať, že prostý súčet rýchlostí je platný len pri presne čelnom alebo kolmom vetre na trať, pri všetkých ostatných uhloch vetra je funkcia nelineárna a má kosínusový charakter, teda k vzdušnej rýchlosti sa pripočítava/odpočítava len zložka paralelná s dráhou letu. Grafické riešenie akčného rádia je na obrázku č. 2.



Obr. 2 Akčný rádius

Obrázok kreslíme v ľubovoľnej dĺžkovej mierke, kde smery vyznačujeme vzhľadom k zvolenému poludníku. Zo zvoleného miesta vzletu A nakreslíme trať letu do miesta určenia B. Na tejto trati v ľubovoľnom mieste C nekreslíme vektor vetra, v našom prípade tak, aby koniec vektora bol v bode C. Z počiatočného bodu vektora vetra D opíšeme kružnicu o polomere veľkosti pravej vzdušnej rýchlosti, ktorá pretne trať v bodoch E a F. Tým je vyriešený základný navigačný trojuholník. Úsečky EC a CF predstavujú traťové rýchlosti von (V) a späť (S).

Bodom C vedieme rovnobežku so spojnicou FD, čo nám pretne spojnicu ED v bode G. Týmto bodom vedieme rovnobežku so smerom vetra, ktorá nám pretne trať v bode H. Úsečka EC predstavuje akčný rádius za jednu hodinu (tzn. že lietadlo preletí vzdialenosť HC v smere tam i späť za 1 hodinu). Rovnaký výsledok dostaneme, keď urobíme podobné riešenie pomocou rovnobežky so spojnicou DE, ktorá pretne DF v bode I a rovnobežka so smerom vetra vedená týmto bodom pretne trať v bode J. Vzdialenosť CJ je rovnako dlhá ako vzdialenosť CH, čo znamená že je to tiež akčný rádius lietadla za jednu hodinu.

Výpočtové riešenie akčného rádia:

Pri výpočte vychádzame z predpokladu, že celková doba letu pozostáva z doby letu von a doby letu späť, pričom dĺžka trate (AR) je rovnaká, ale traťové rýchlosti (V,S) sú rôzne. Potom platí, že

$$D = \frac{AR}{V} + \frac{AR}{S} \quad \text{z čoho sa dá odvodiť} \quad AR = \frac{D * V * S}{V + S} \quad (4)$$

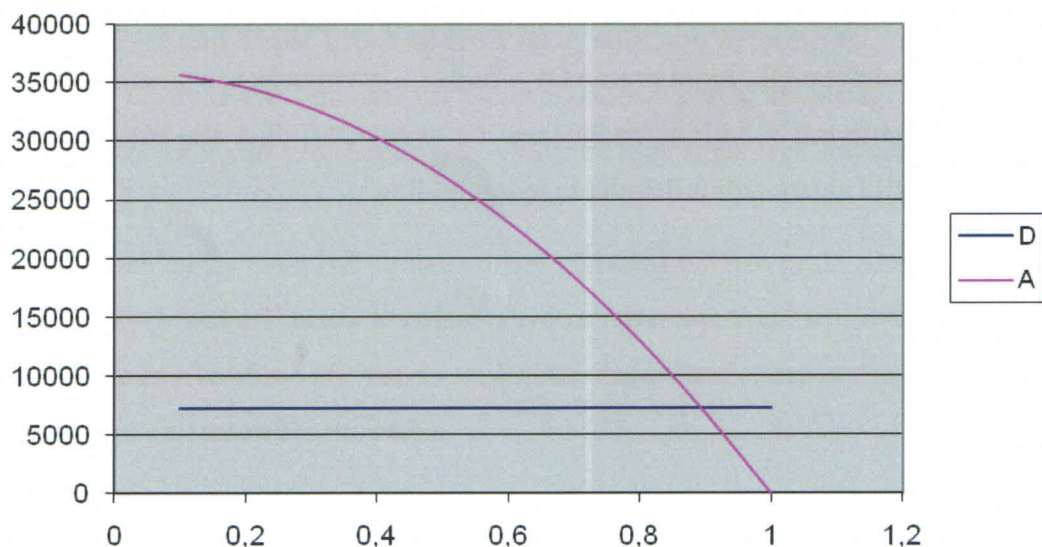
Pre traťové rýchlosti V a S platí, že sú vektorovým súčtom vzdušnej rýchlosti a rýchlosti vetra. Pre konkrétny výpočet je možné využiť $V = S = \vec{v} + \vec{U}$ rovnicu (2).

Pre ďalšie úvahy vstupné predpoklady zjednodušíme na presný čelný respektíve chrbtový vietor, takže odpadnú komplikácie s uhlom znosu a závery budú aj tak obecné platné. V takom prípade potom $V=v-u$ a analogicky $S=v+u$

Pre obecné riešenie je vhodné namiesto konkrétnych rýchlostí použiť pomernú rýchlosť vetra voči vzdušnej rýchlosti lietadla $\frac{u}{v}$. Po dosadení do rovnice (4) a úpravách dostaneme záverečnú rovnicu

$$AR = D \frac{v - \frac{u^2}{v}}{2} \quad (5)$$

ktorá vyjadruje ako je pomerne závislý akčný rádius od pomernej rýchlosti vetra. Táto závislosť má kvadratický charakter, čo je zrejmé aj z grafu, kde boli dosadené pomerné hodnoty rýchlosti vetra od 0 do 100% s krokom 10%. Ako vstupné hodnoty boli zvolené rýchlosť lietadla 10 m/s, doba letu 7200 sekúnd a AR potom vychádza v metroch.



Ako je z grafu zrejmé, tak až do hodnoty pomerného vetra cca 50% sa akčný rádius ~~sa~~ znižuje ale nijako dramaticky. Ale pri vyšších hodnotách je pokles už výrazný a značne ~~limituje~~ možnosti operácie vzdušných prostriedkov letiacich malou rýchlosťou. Dá sa povedať, ~~že~~ pri medzných hodnotách je takýto prostriedok prakticky pripútaný k miestu vzletu, pretože ~~akkoľvek~~ vzdialenie sa po vetre vyžaduje dlhodobý návrat, prípadne je návrat nemožný.

IV. Záver

Malé bezpilotné prostriedky sú veľmi efektívnym prostriedkom pre široké spektrum úloh. Ich výrobcovia radi zdôrazňujú ich výhody ako je relatívne nízka cena, jednoduché nasadenie, bezpečnosť a pod. menej radi pripustia ich limity a nedostatky. Cieľom tohto článku bolo analyzovať jeden z limitov, ktorý je fyzikálne daný a preto je neprekonateľný a musí byť braný do úvahy pri rozvažovaní nasadenia takýchto prostriedkov.

Literatúra

1. BENEŠ Ladislav a kol.: Učebnice pilota, SVĚT KŘÍDEL, Praha 1995, ISBN 80-85280-30-2
2. NEDELKA Milan a kol.: Slovenský letecký slovník terminologický a výkladový, MAGNET-PRESS SLOVAKIA, Bratislava 1998, ISBN 80-968073-0-7
3. ĎURČO Stanislav: Letecká navigace, VVLŠ SNP, Košice 1986
4. JALOVECKÝ Martin: Navigace-Učebné texty ATPL (A), CERM, Brno 2002, ISBN 80-7204-246-7
5. KEVICKÝ Dušan, PŘIBYL Karel: LETECKÁ NAVIGACE, Nakladatelství dopravy a spojů, Praha 1980

Článok je publikovaný ako jeden z výstupov projektu:

„Brokerské centrum leteckej dopravy pre transfer technológií a znalostí do dopravy a dopravnej infraštruktúry ITMS 26220220156.“

Podporujeme výskumné aktivity na Slovensku/ Projekt je spolufinancovaný zo zdrojov EÚ

