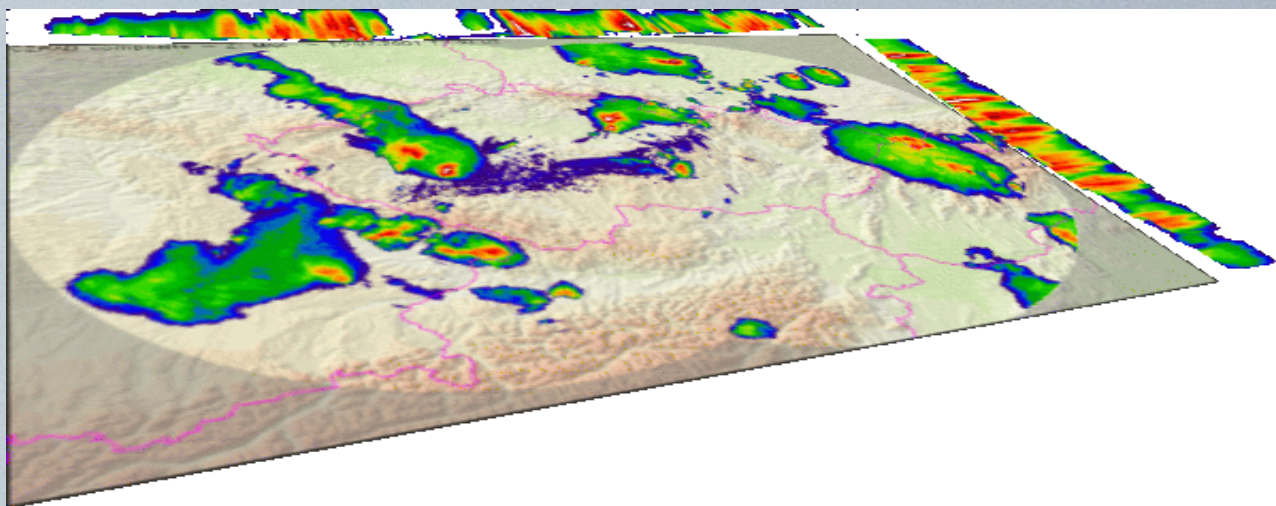


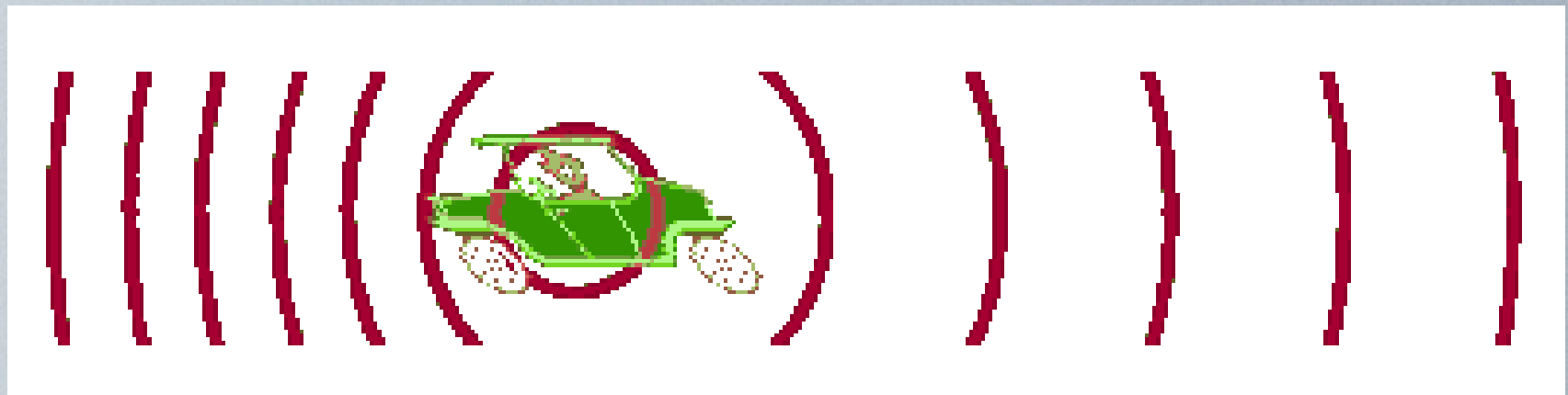
# Radarová meteorologie - dopplerovské radary



*Petr Novák, Milan Šálek*

*Český Hydrometeorologický ústav, oddělení radarových měření*

# Doppleruv jev (efekt)



# Dopplerovské meteorologické radiolokátory

- umožňují běžné měření množství zpětné rozptýlené energie a tím radiolokacní odrazivosti  $Z$
- navíc měří změnu frekvence navraceného signálu (prostřednictvím měření fáze), z které lze určit **radiální rychlosti odražečů**, jimiž jsou převážně atmosférické srážky a nehomogenity indexu lomu.

$$f_d = -\frac{2v_r}{\lambda}.$$

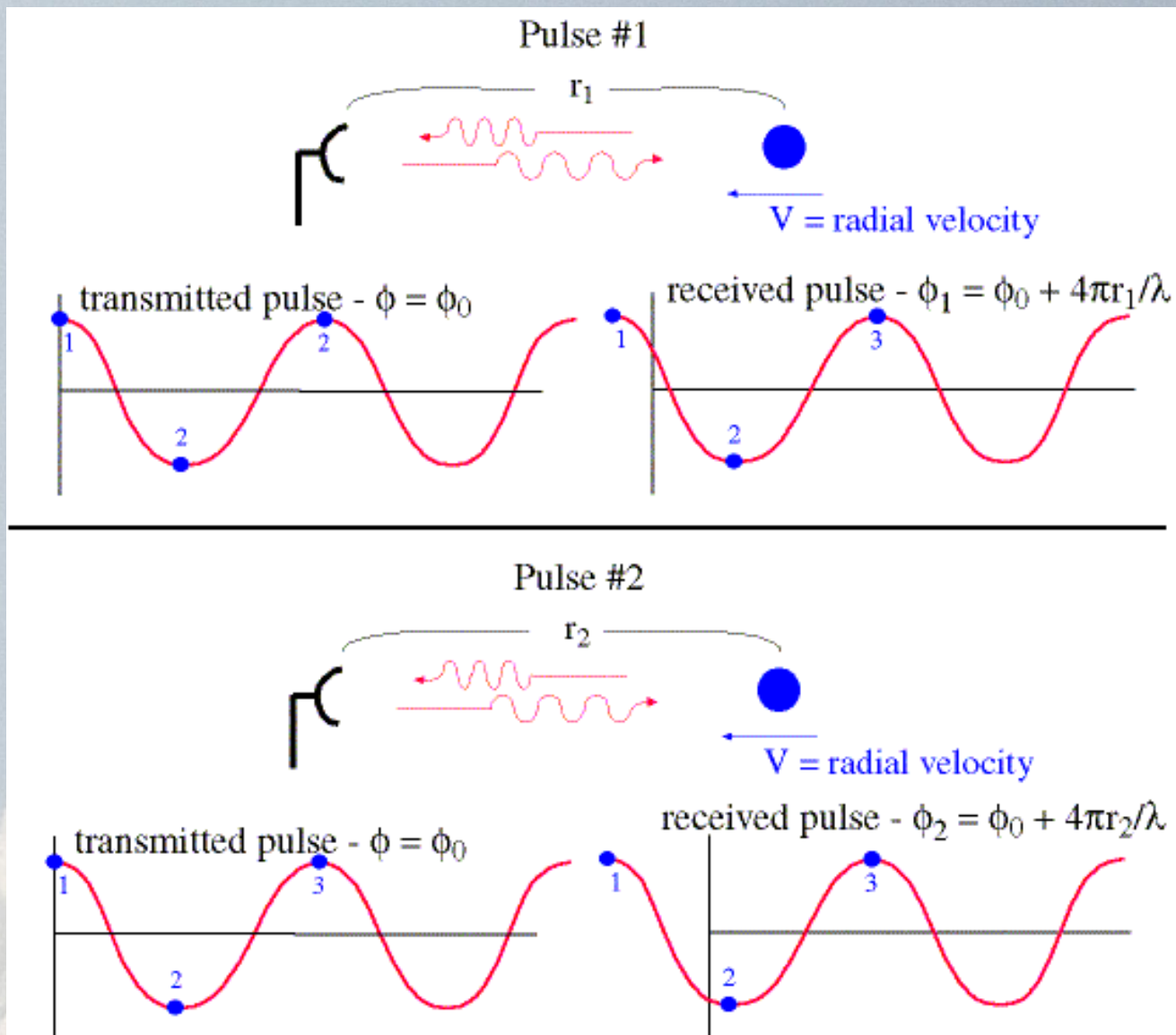
# Dopplerovské meteorologické radiolokátory

Dopplerovský posun frekvence  $f_d$  (řádu stovek Hz) je při meteorologických pozorováních vzhledem k vysílací frekvenci (řádu jednotek GHz) příliš malý, než aby jej bylo možno měřit přímo. Dopplerovské (koherentní) radiolokátory proto pracují na principu porovnání fáze přijatého signálu s referenčním (původně vyslaným) signálem, jehož fáze je při každém pulsu zapamatována v koherentním oscilátoru (podrobněji např. v [7], [4], [13]).

Fázový posun během vysílání jednotlivého pulsu je příliš malý (například pro  $v_r = 20$  m/s a  $\lambda = 5$  cm dostáváme  $f_d = 800$  Hz a fázová změna  $\omega_d \tau$  za dobu trvání pulsu  $\tau = 1$   $\mu$ s je pouze  $0.005^\circ$ ), proto se  $\omega_d$  v dané vzdálenosti od radaru určuje ze dvou po sobě jdoucích pulsů. Pro dva následné pulsy  $n-1$  a  $n$  měříme fázi přijatého signálu  $\varphi_{r_{n-1}}$ ,  $\varphi_{r_n}$  během času  $T_s = f_r^{-1}$

$$\frac{\Delta\varphi_r}{\Delta t} = \frac{\varphi_{r_n} - \varphi_{r_{n-1}}}{T_s} = \omega_d. \quad (7)$$

# Měření fáze přijatého signálu



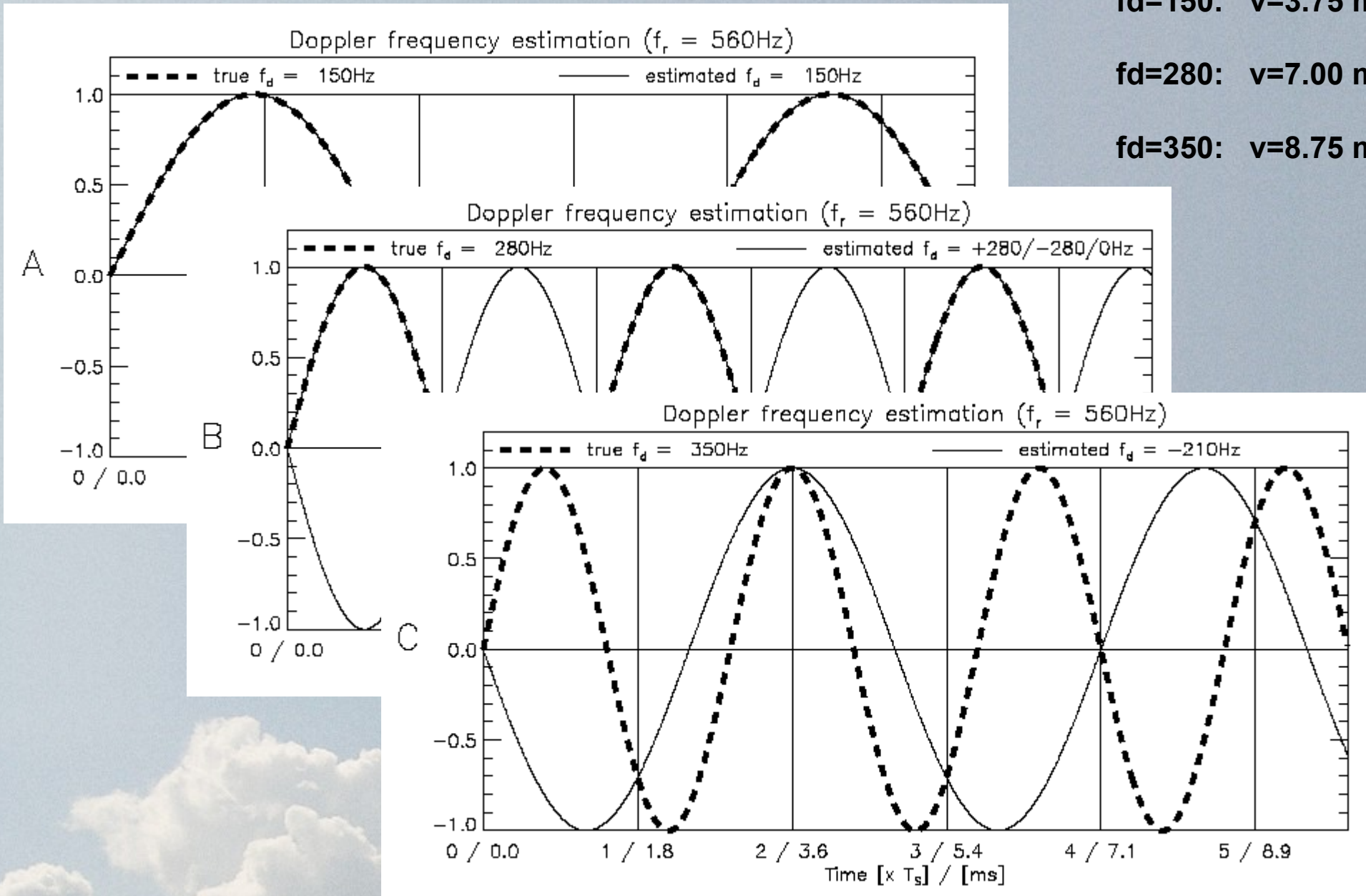
# Dopplerovské dilema ( $f_r = \text{PRF}$ )

$\lambda = 5 \text{ cm}$ :

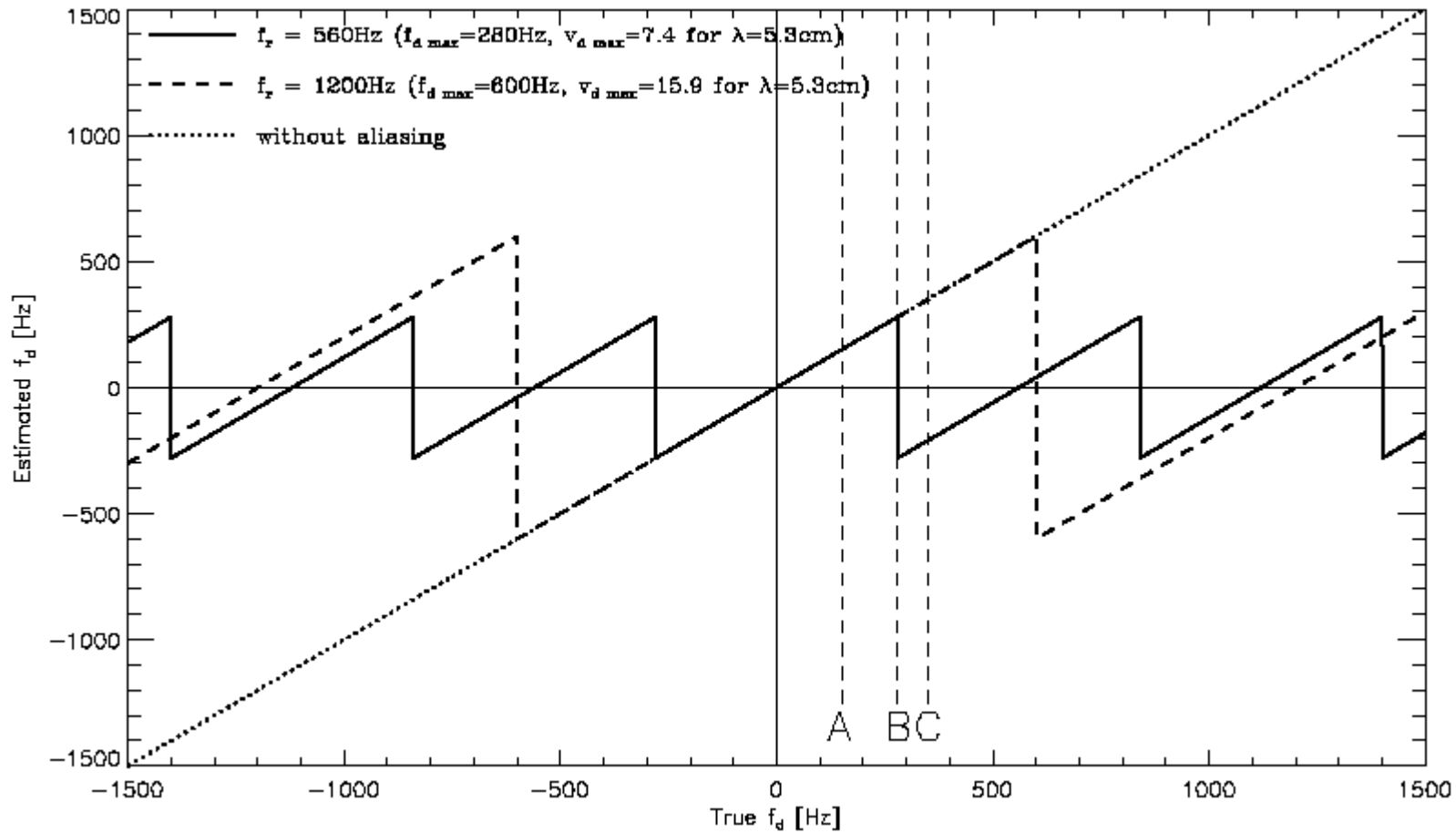
$f_d = 150$ :  $v = 3.75 \text{ m/s}$

$f_d = 280$ :  $v = 7.00 \text{ m/s}$

$f_d = 350$ :  $v = 8.75 \text{ m/s}$



# Dopplerovské dilema



**lambda=5 cm:**

**fd=150: v=3.75 m/s**

**fd=280: v=7.00 m/s**

**fd=350: v=8.75 m/s**

# Dopplerovské dilema

- maximální jednoznačně určitelná rychlost, tzv. Nyquistova rychlost - (přesně polovina rychlosti světla B)

$$v_{dmax} = \frac{f_{dmax} \lambda}{2} = \frac{f_r \lambda}{4}.$$

- maximální dosah (second-trip echo)

$$r_{max} = \frac{cT_s}{2} = \frac{c}{2f_r}.$$

- kombinací získáváme vztah nazývaný dopplerovské dilema

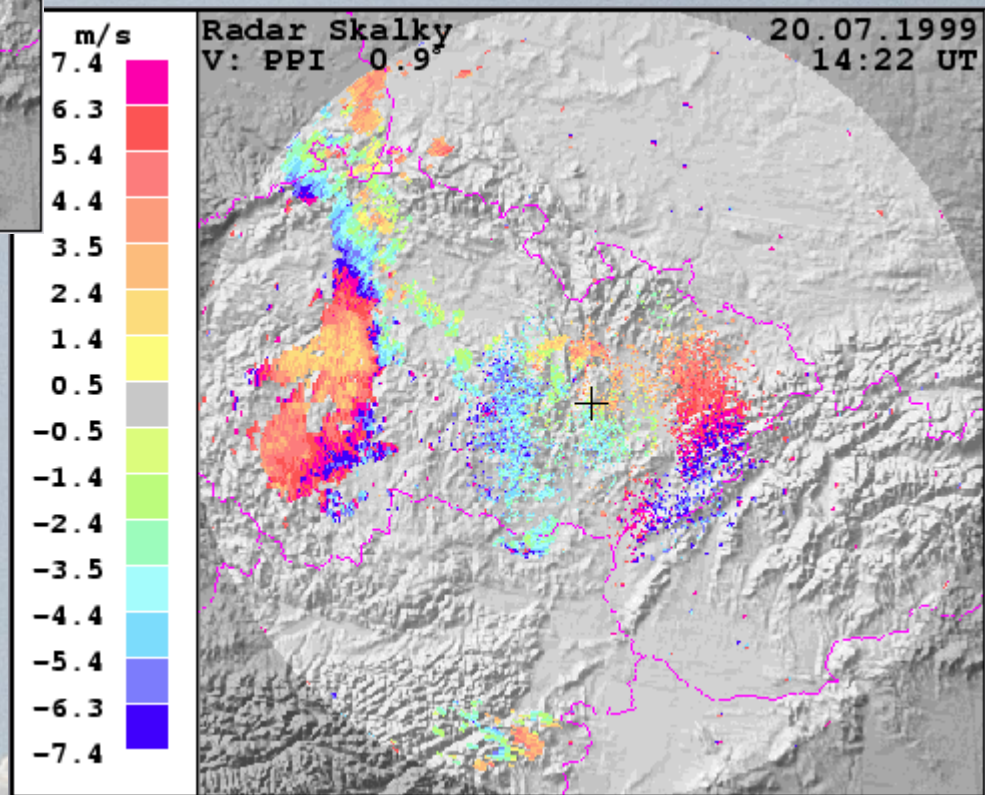
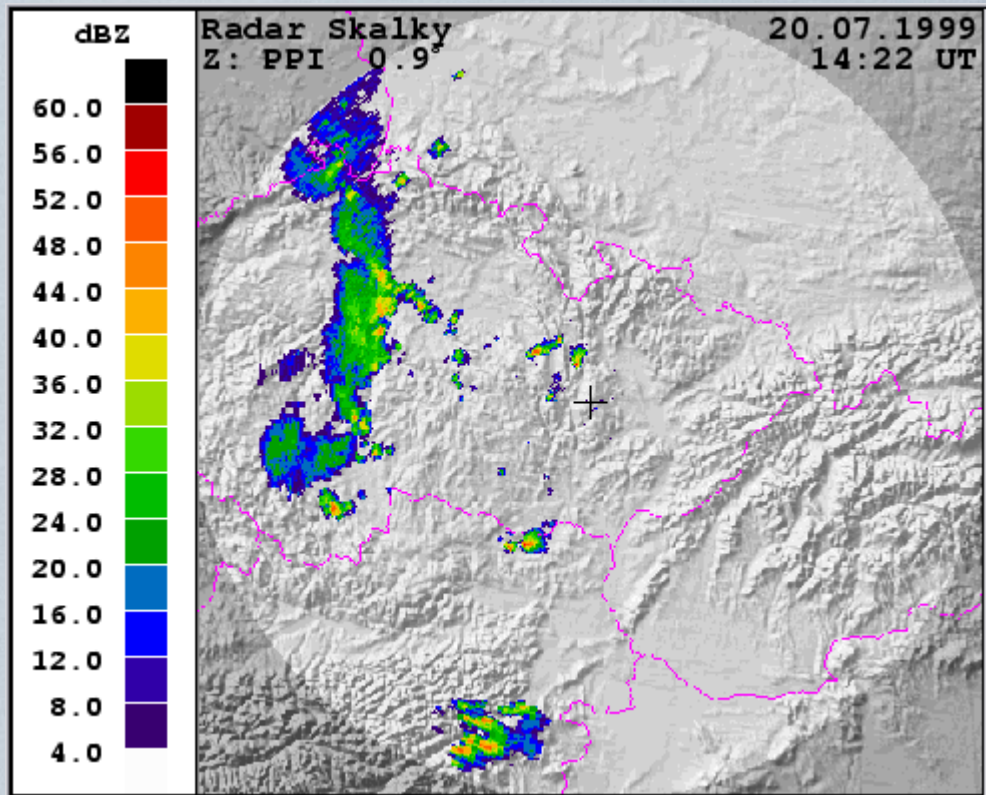
$$v_{dmax} r_{max} = \frac{c\lambda}{8}.$$

- není možné zároveň dosáhnout libovolně vysoké  $r_{max}$  a  $v_{dmax}$

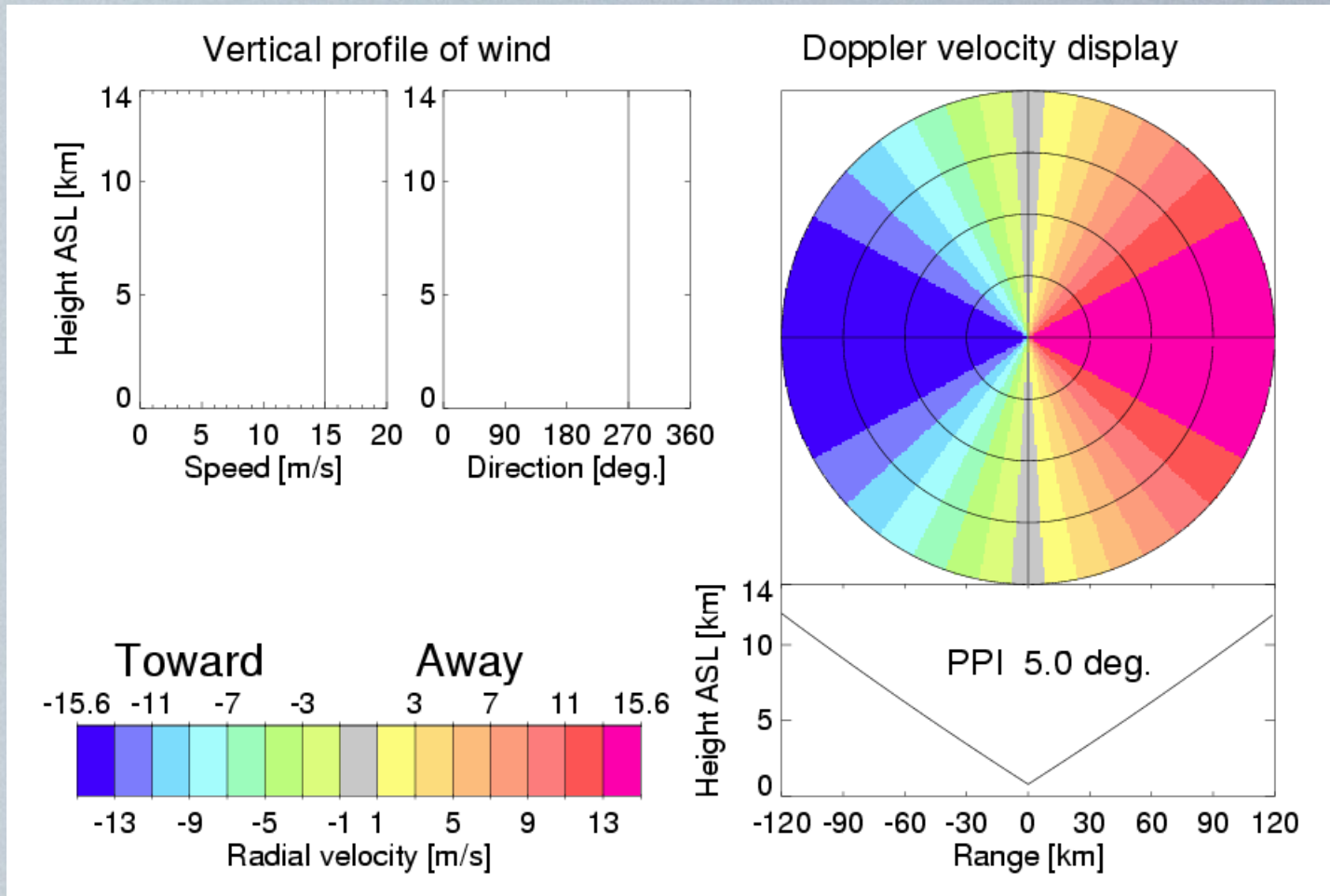


# Hlavní operativní využití dopplerovských rychlostí

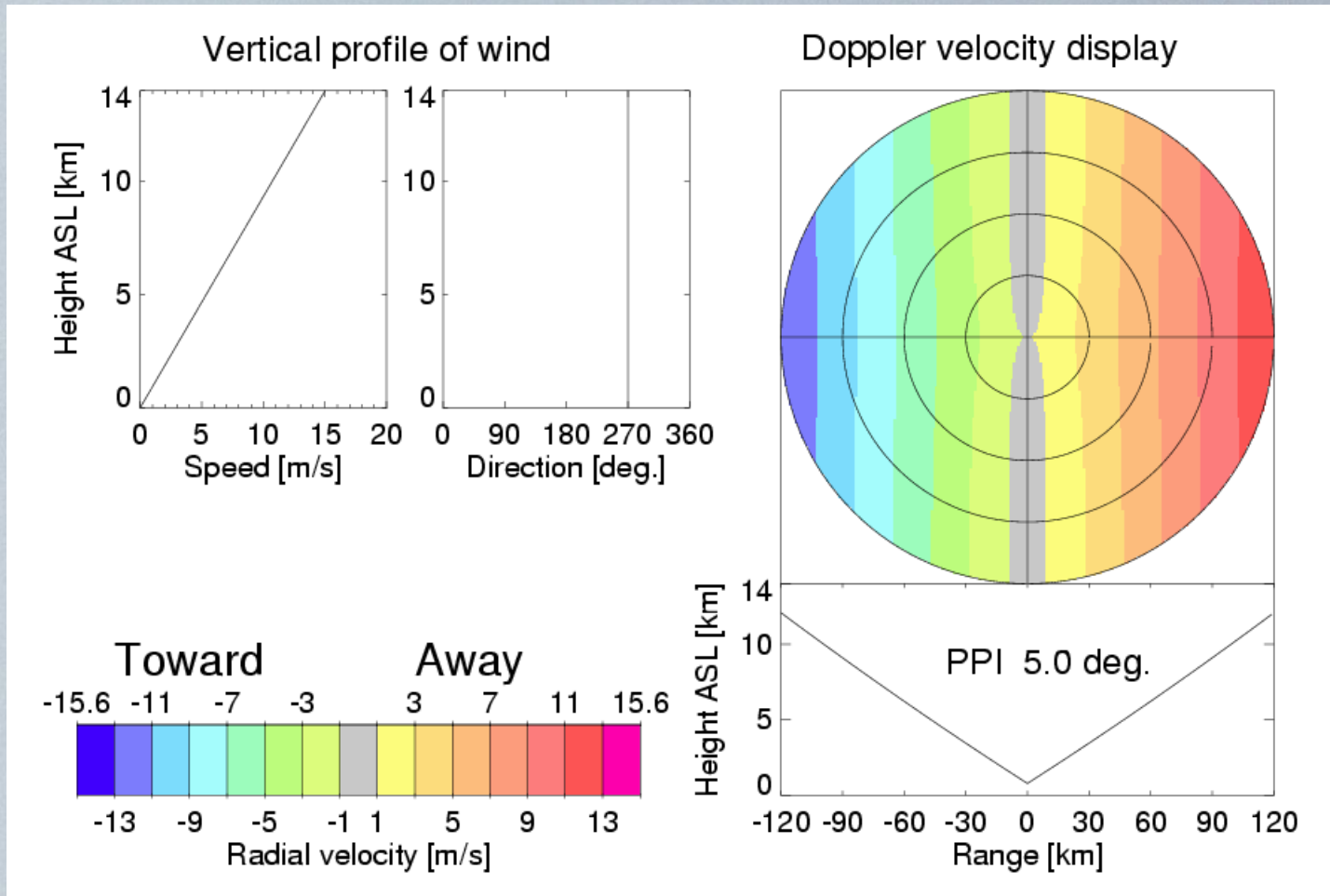
- identifikace (a následné vymazávání) odrazů od pozemních cílů ( $V = 0$ )
- analýza proudění ve srážkové oblačnosti (radiální rychlosti PPI, RHI) - detekce rotace, divergence (mezocyklony, tornáda)
- výpočet vertikálního profilu větru za předpokladu horizontálně konstantního proudění (pouze za přítomnosti odražečů)
- vyhodnocení šířky spektra  $\sigma$  vztahující se k intenzitě turbulence



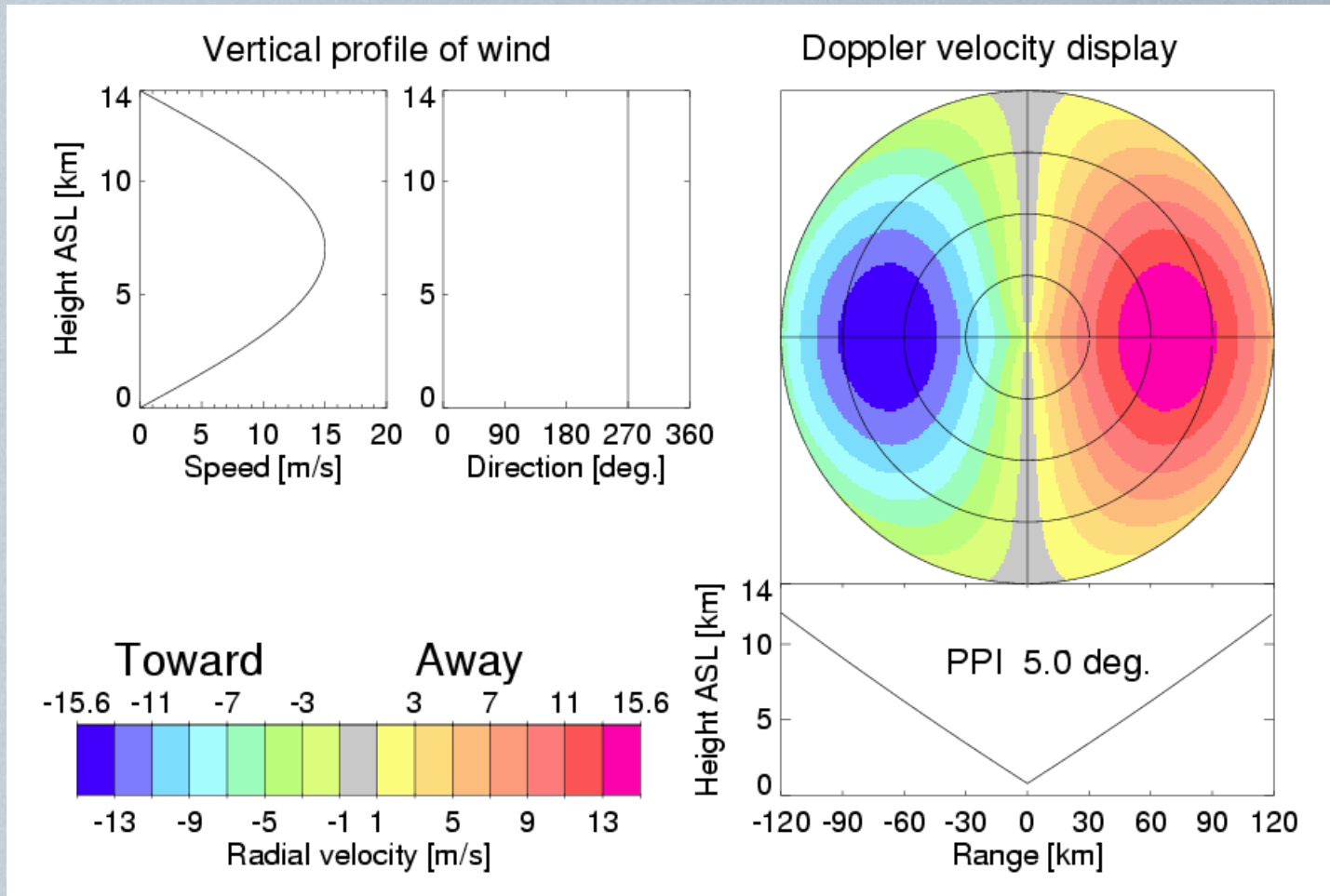
# Umělá data radiálních rychlostí



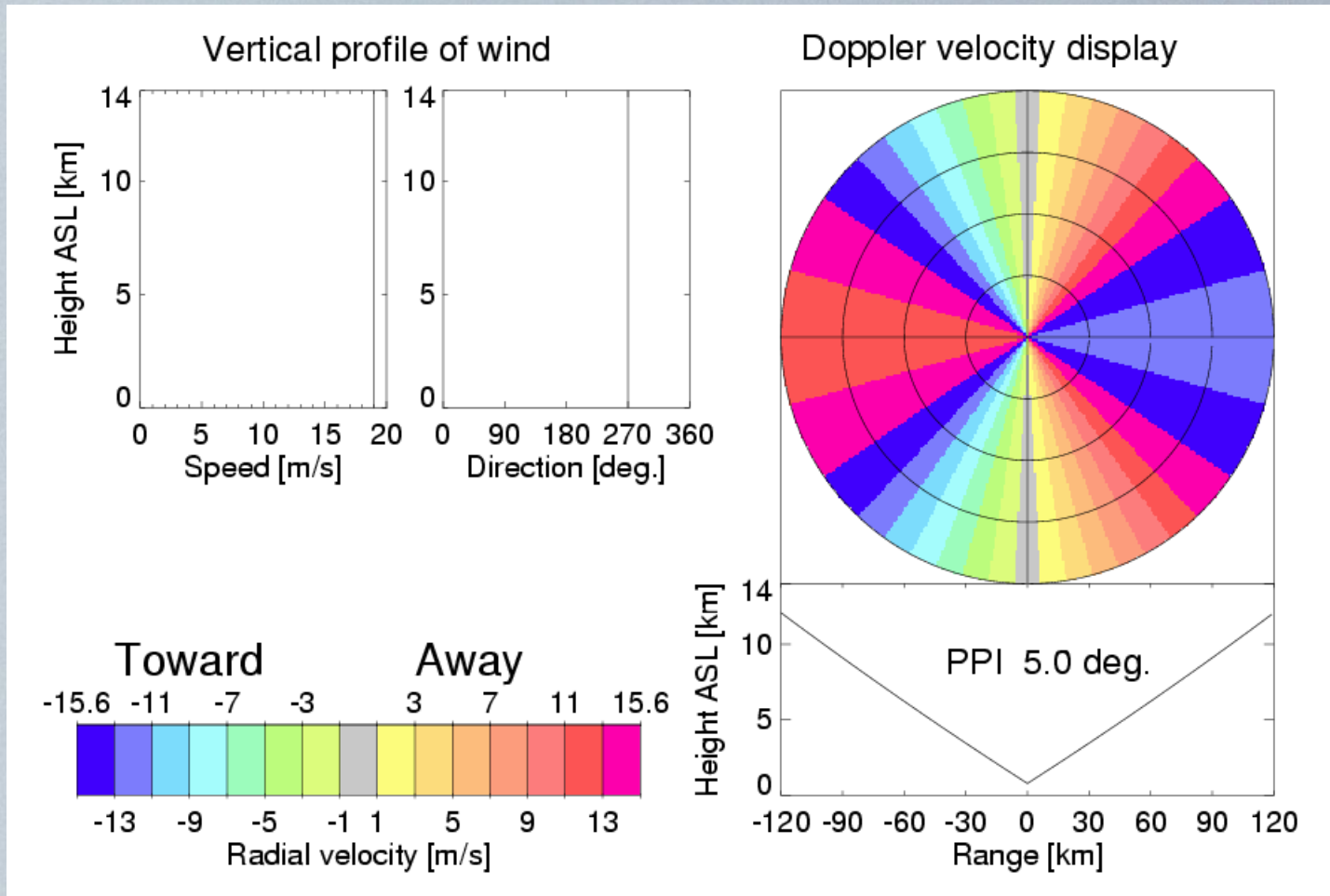
# Umělá data radiálních rychlostí



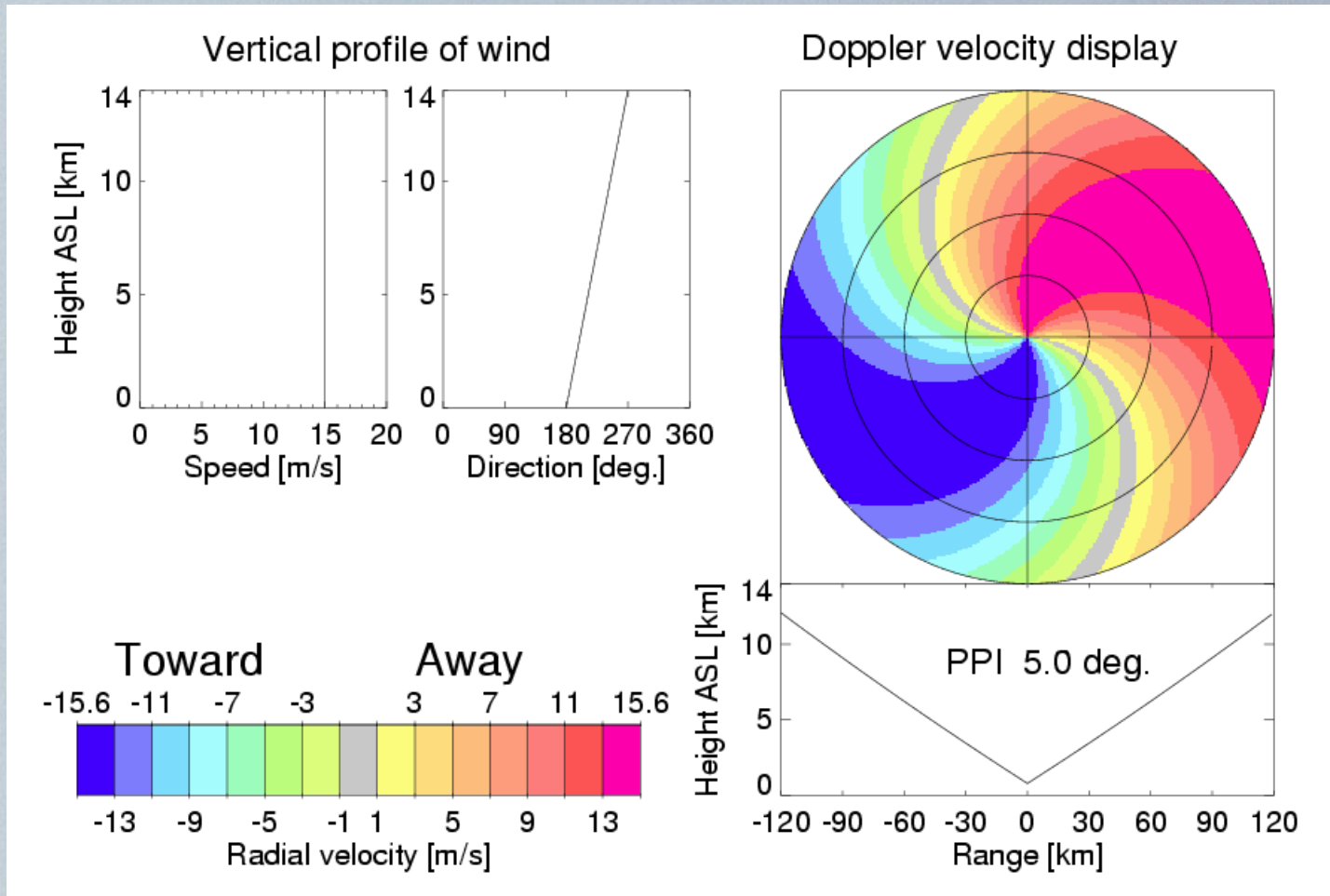
# Umělá data radiálních rychlostí



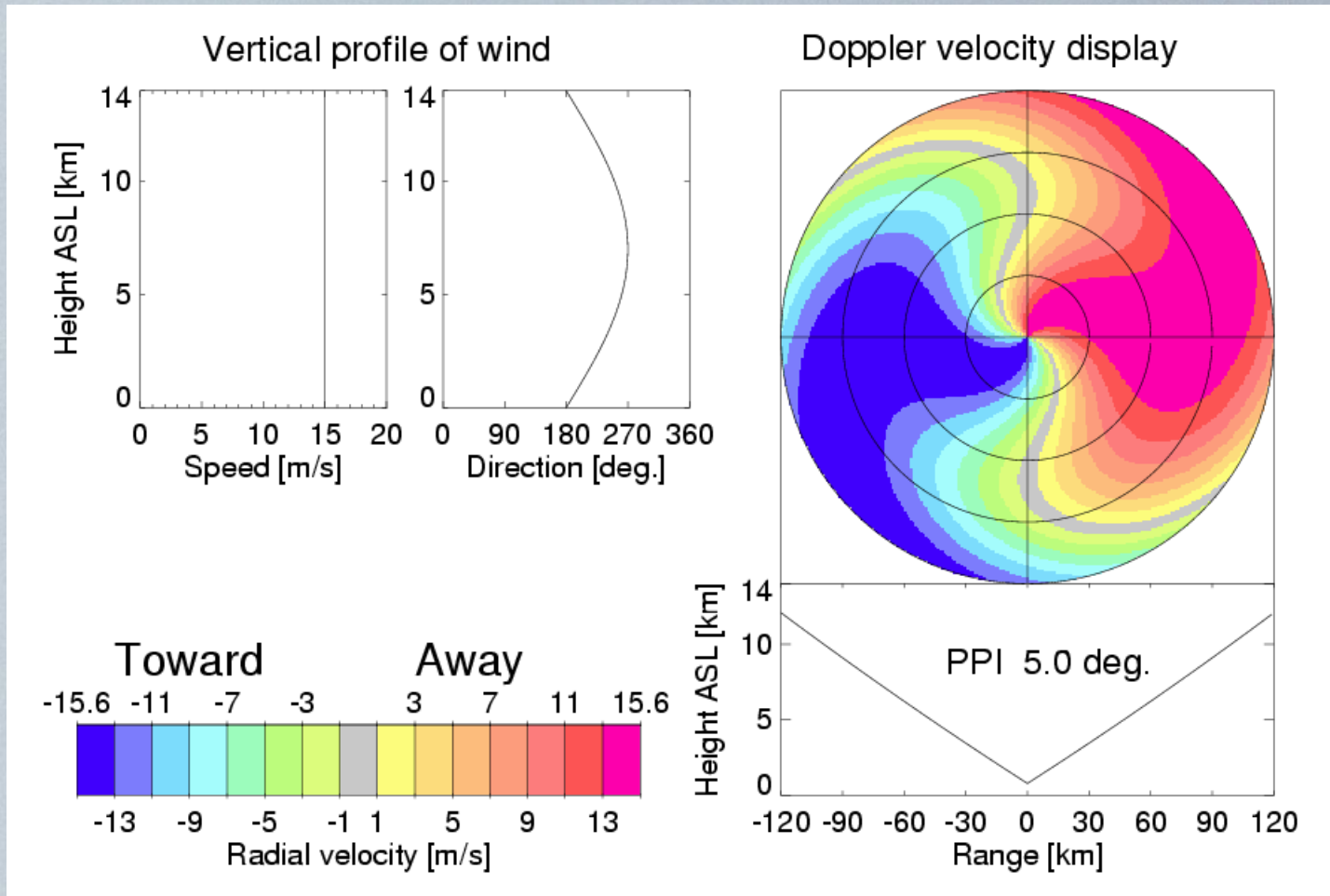
# Umělá data radiálních rychlostí



# Umělá data radiálních rychlostí

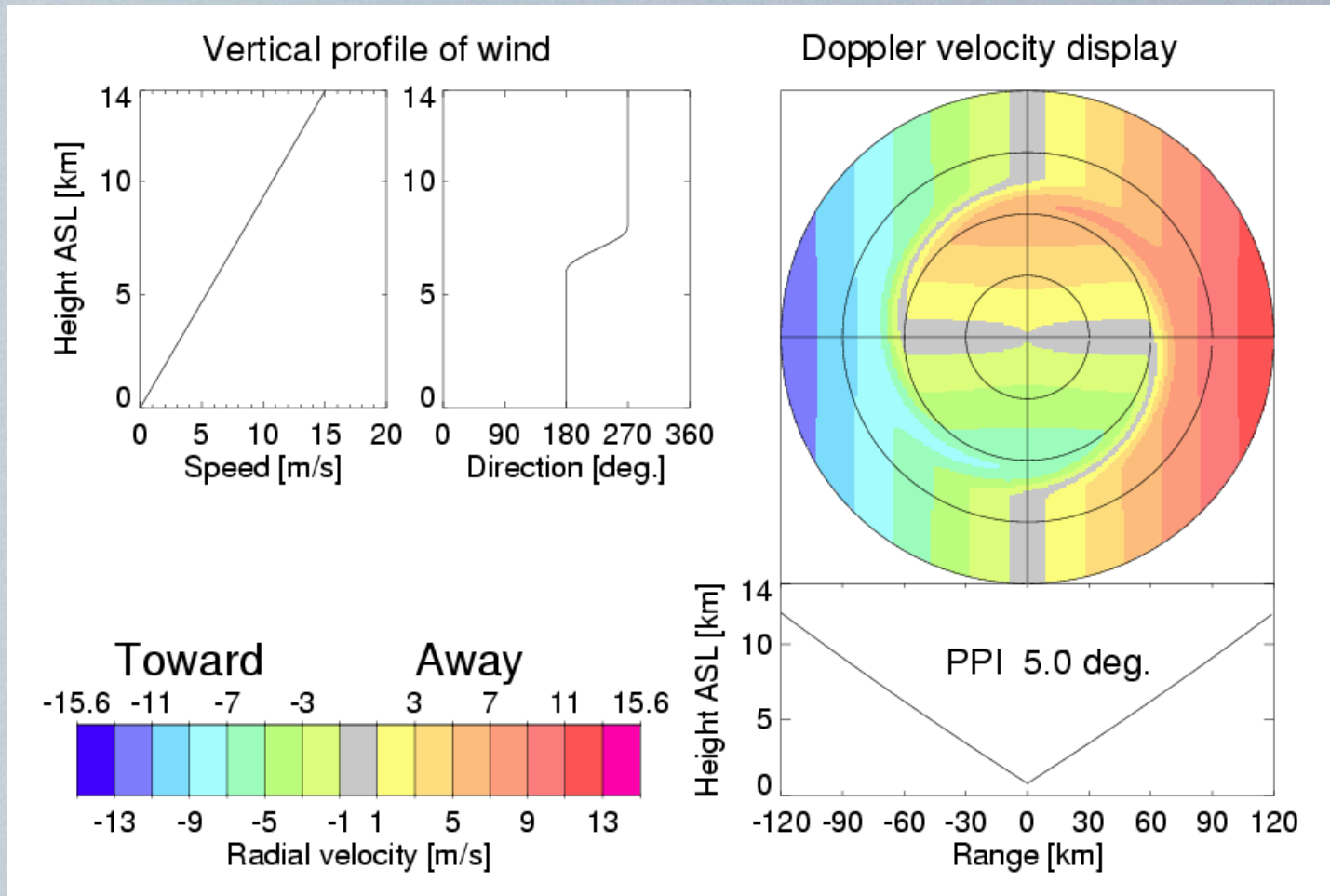


# Umělá data radiálních rychlostí

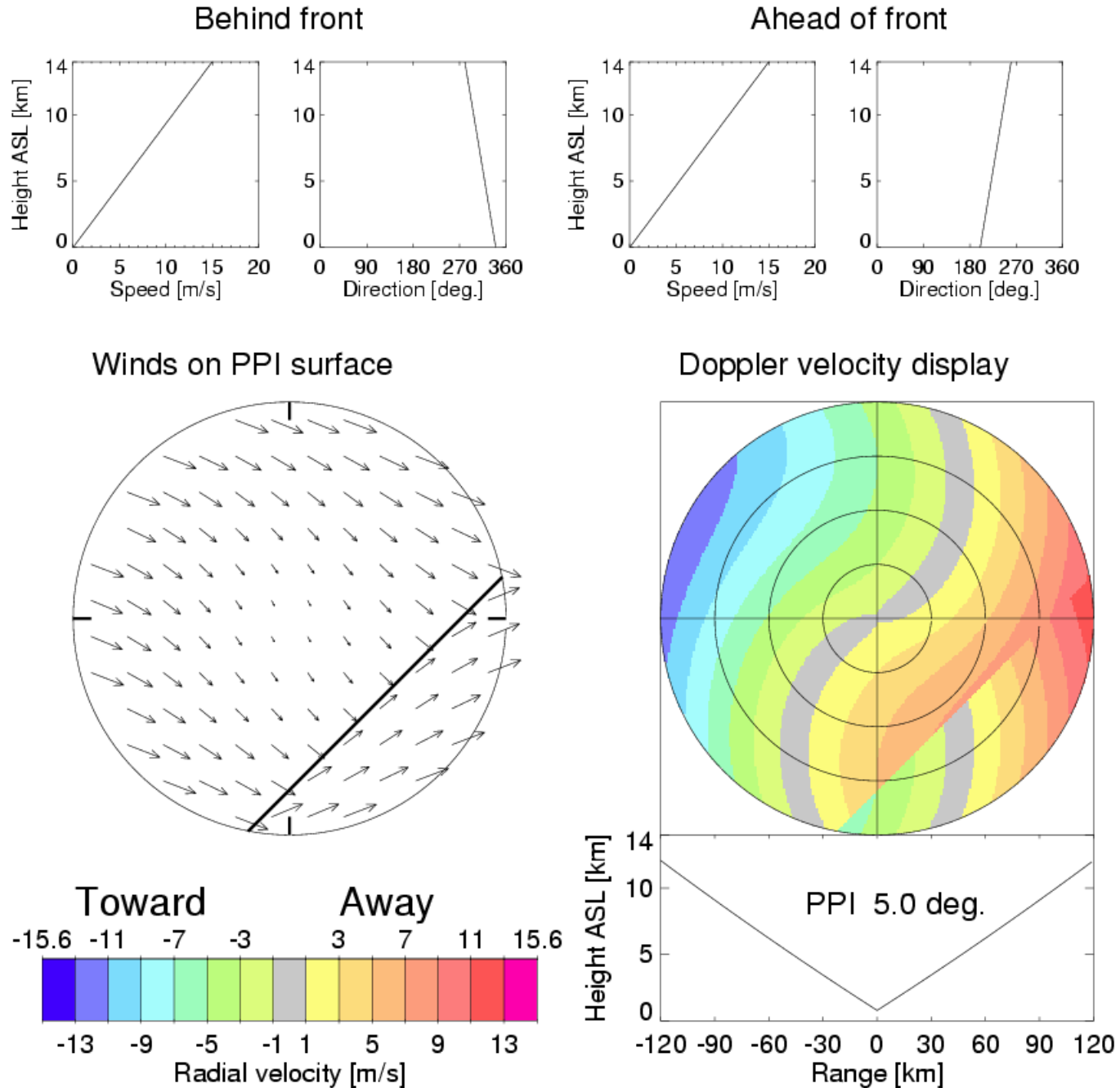




# Umělá data radiálních rychlostí

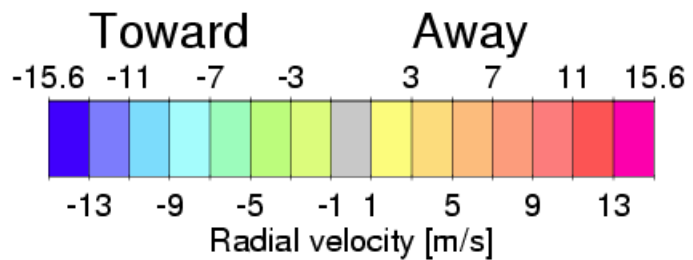
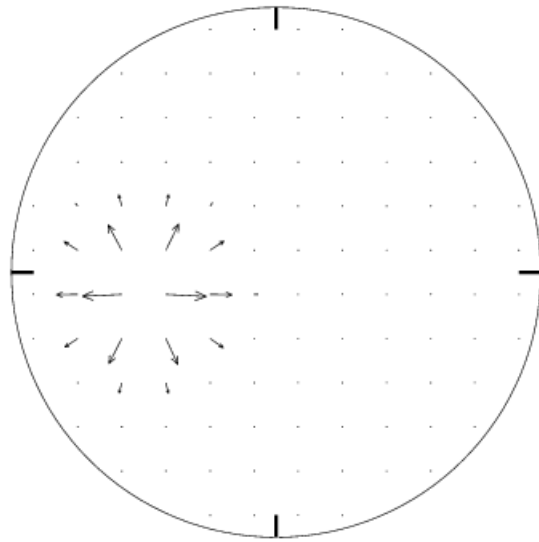


# Umělá data radiálních rychlostí

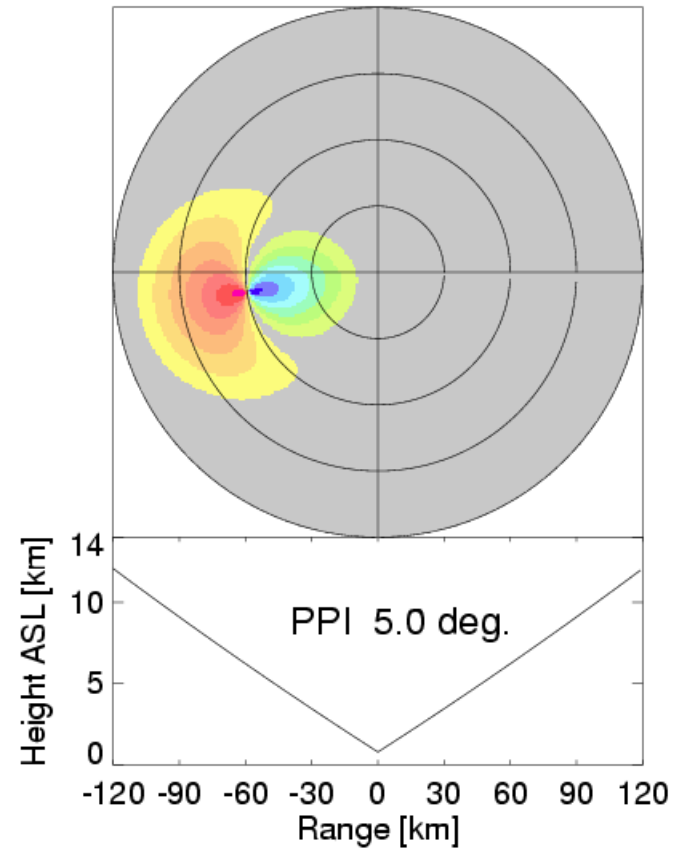


# Umělá data radiálních rychlostí

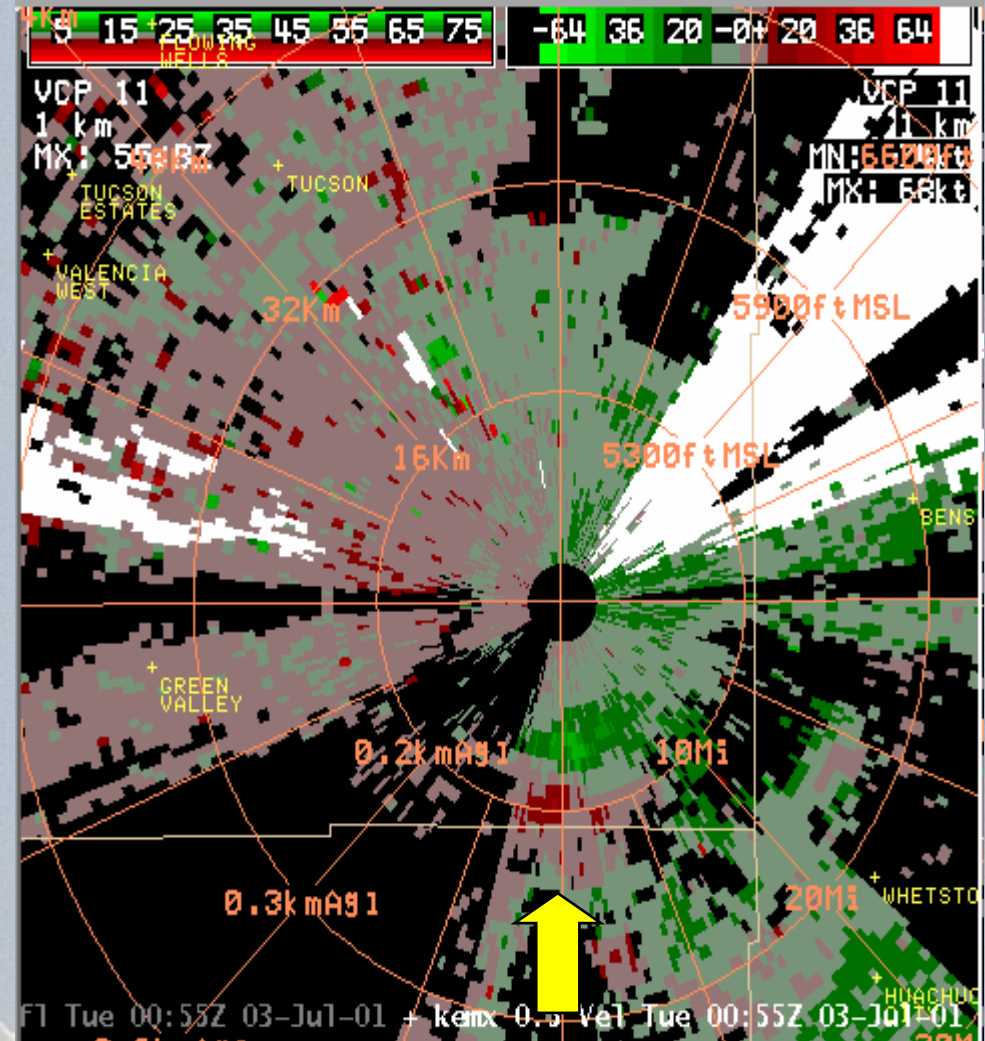
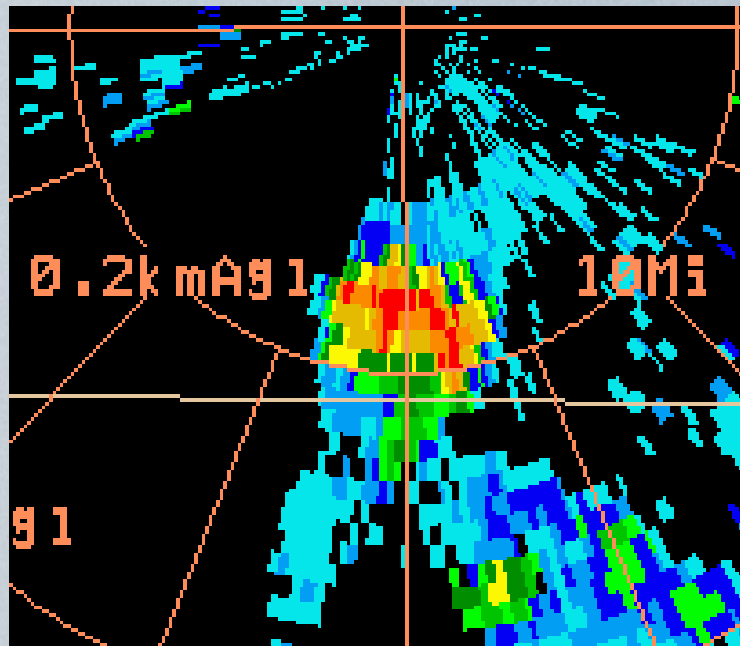
Winds on PPI surface



Doppler velocity display

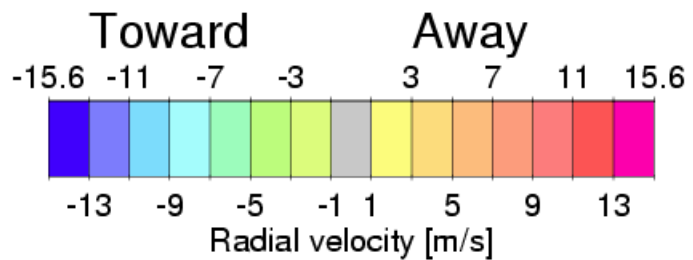
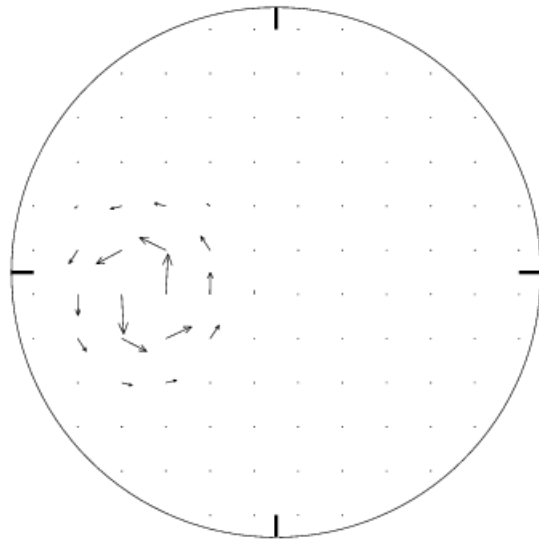


# Pulse Storm Downbursts

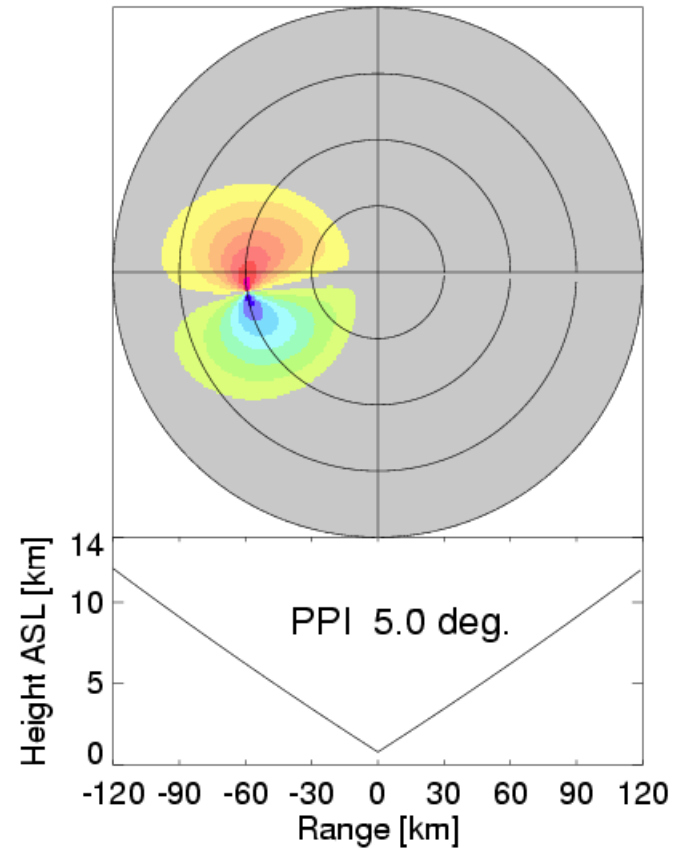


# Umělá data radiálních rychlostí

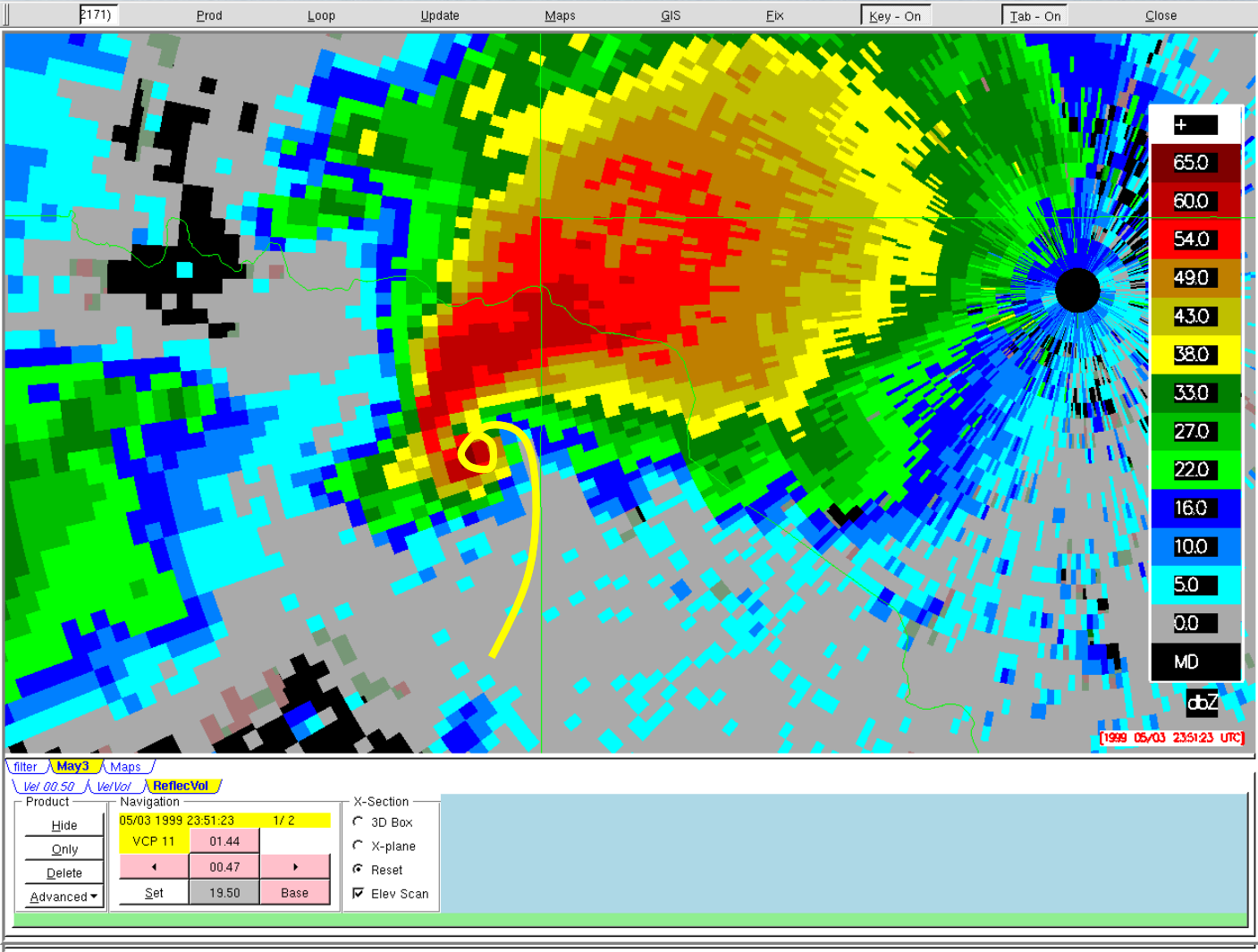
Winds on PPI surface



Doppler velocity display

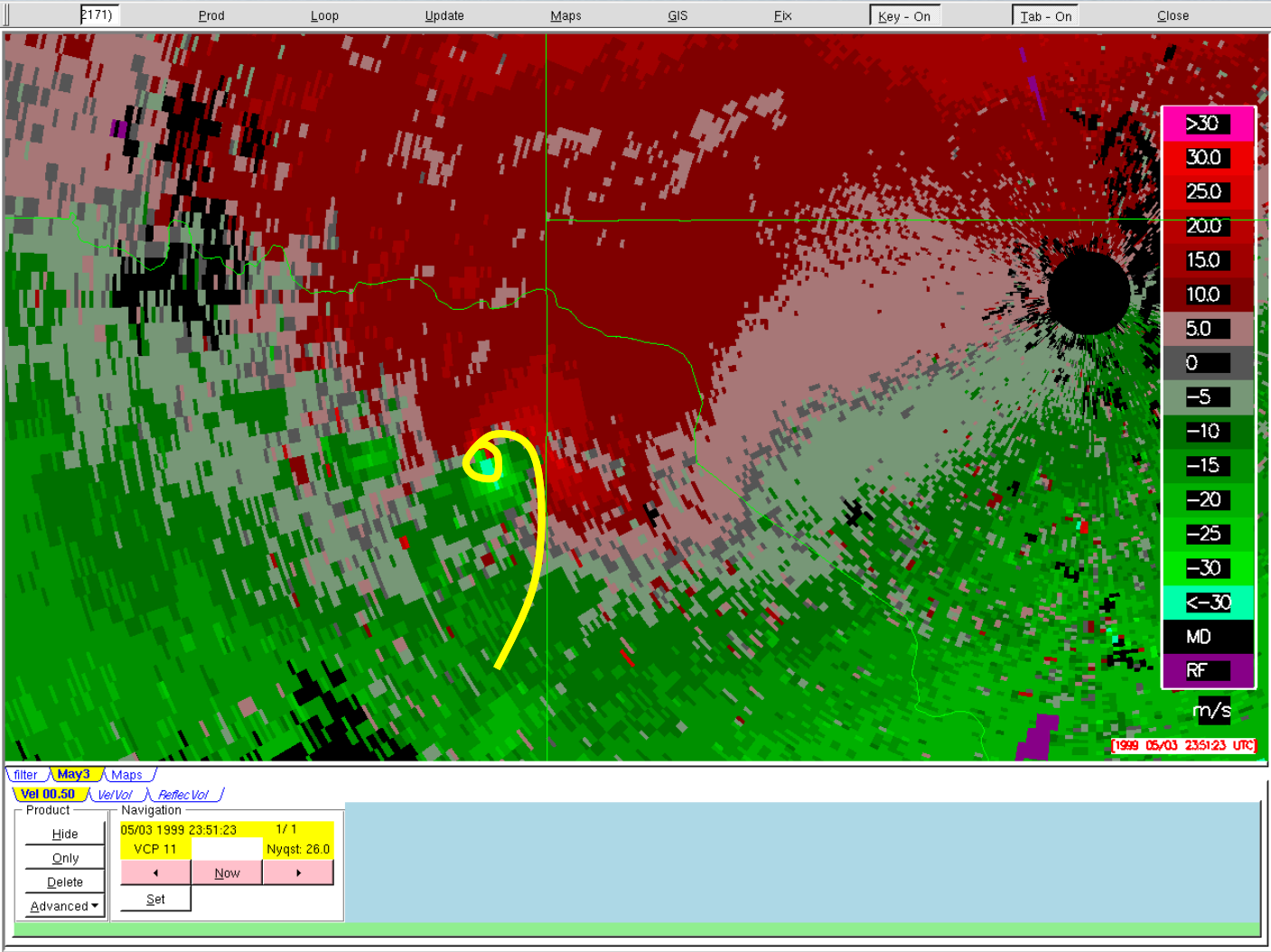


# CL Supercell Example (3 May 99 OKC)



*Reflectivity*

# CL Supercell Example (3 May 99 OKC)

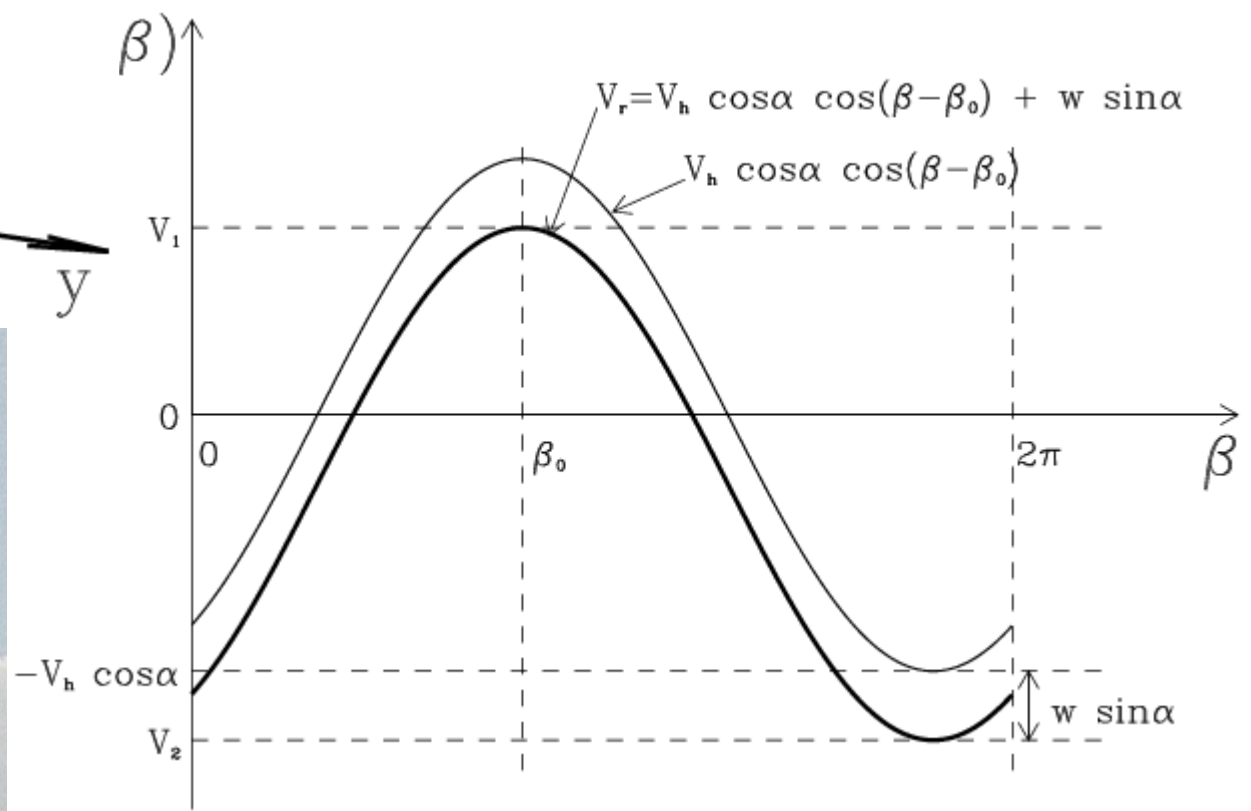
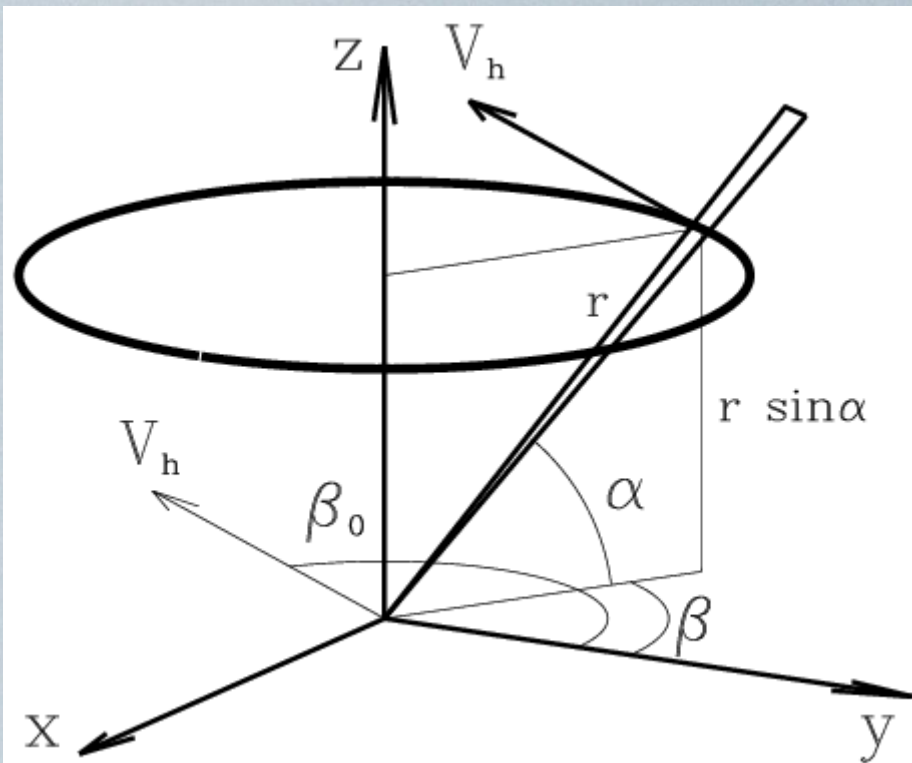


*Velocity*

# VAD - Velocity Azimuth Display

Data radiálních rychlostí z konstantní vzdálenosti (konstantní výšky) jsou vyznačeny jako funkce azimutu.

Horizontálně uniformní pole proudění -> funkce sinus

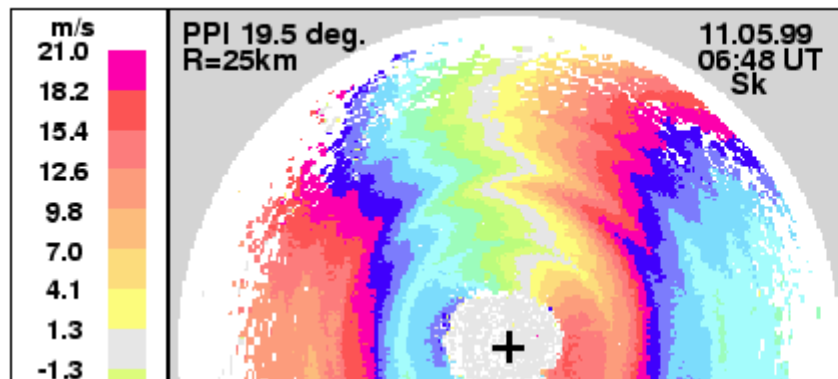


$$\bar{V}_h = \frac{V_1 - V_2}{2 \cos \alpha}$$

$$\bar{w} = \frac{V_1 + V_2}{2 \sin \alpha}$$



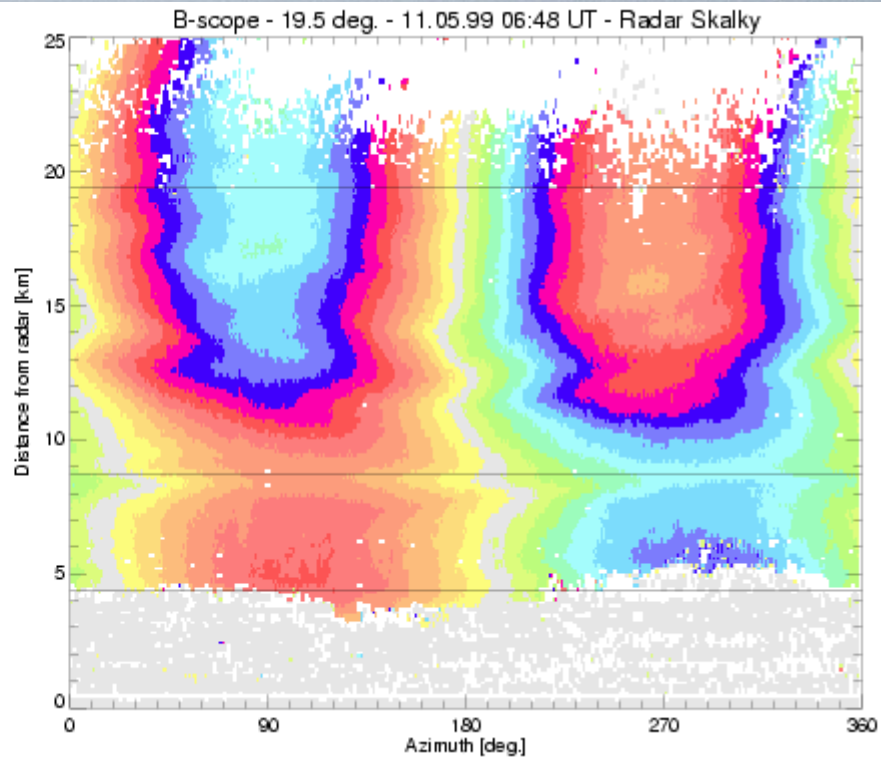
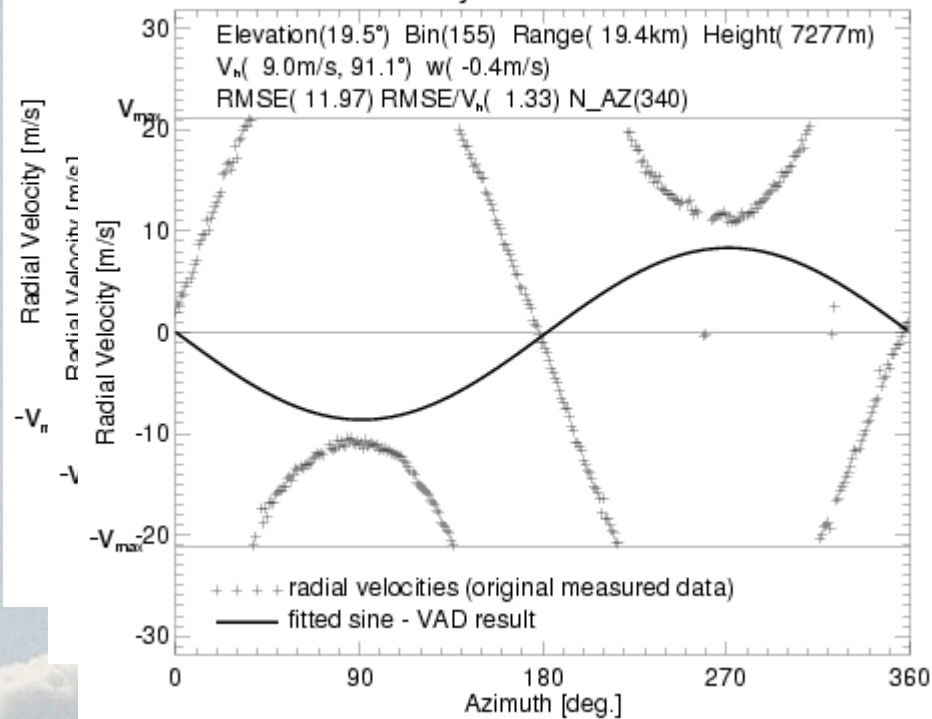
# VAD algorithmus



Radar Skalky -- 11.05.1999 06:48

Radar Skalky -- 11.05.1999 06:48

Radar Skalky -- 11.05.1999 06:48



- šum
- odlehlé hodnoty
- aliasing radiálních rychlostí

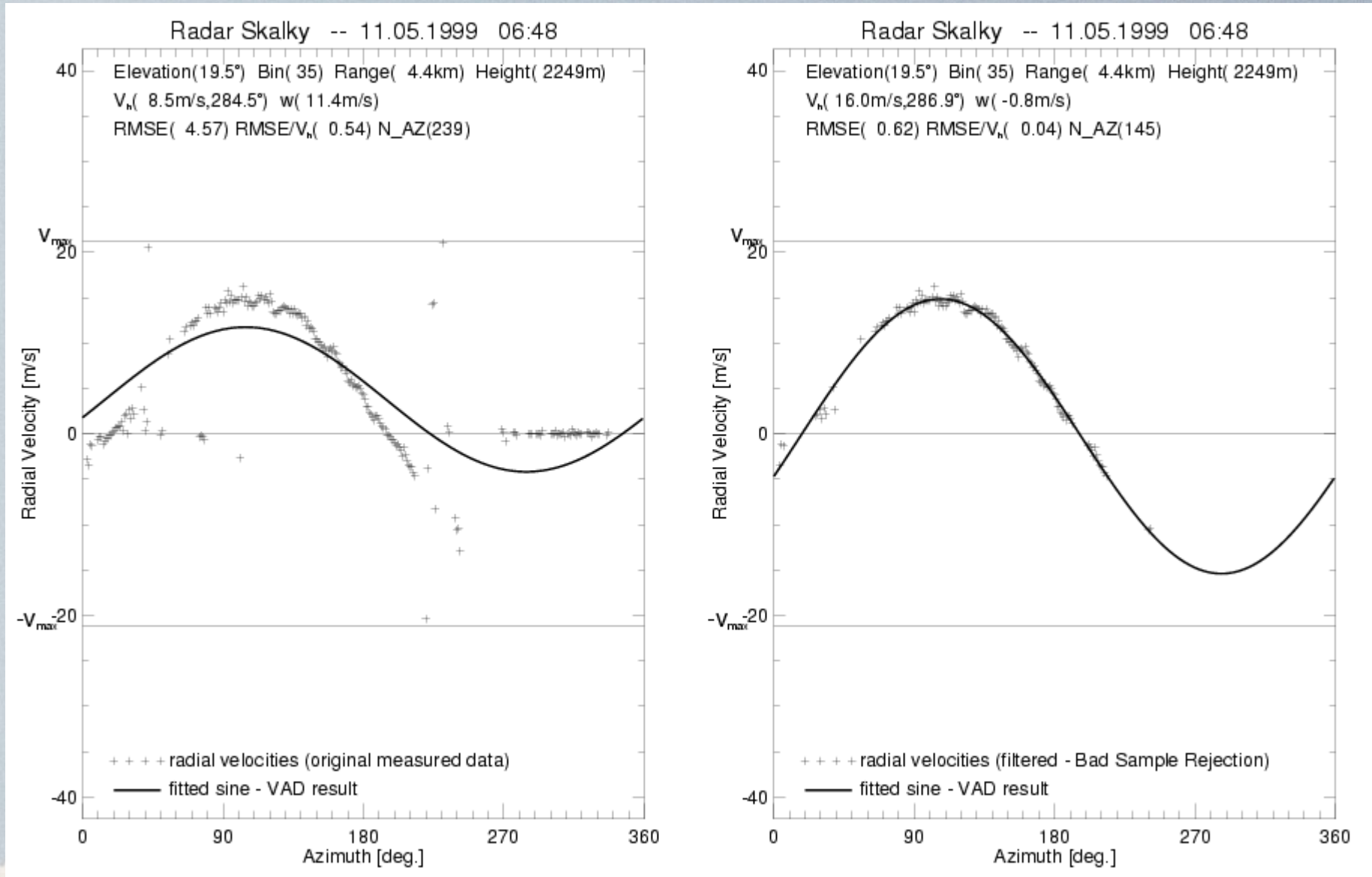
# Modifikovaný VAD algoritmus

- kontrola dat - odmítnutí špatných dat radiálních rychlostí
- „de-aliasing“ radiálních rychlostí
- „napasování“ sinusovky VAD do vyfiltrovaných a de-aliasovaných dat radiálních rychlostí
- finální kontrola kvality

# Odmítnutí špatných dat radiálních rychlostí

- Odmítnutí rychlostí menších než definovaný práh
- kontrola konzistence dat v azimutu a velikosti rychlosti = odstranění odlehlých hodnot

# Odmítnutí špatných dat radiálních rychlostí



# De-aliasing radiálních rychlostí

$$v(\beta) = a_0 + a_1 \cos \beta - b_1 \sin \beta$$

- výpočet derivací radiálních rychlostí podle azimutu - tyto derivace nejsou aliasované
- „napasování“ sinusovky do dat derivací rychlostí

$$\frac{dv(\beta)}{d\beta} = -a_1 \sin \beta - b_1 \cos \beta$$

- výpočet „prvního odhadu větru“

$$v_{1g}(\beta) = a_1 \cos \beta - b_1 \sin \beta$$

# De-aliasing radiálních rychlostí

- porovnání naměřených radiálních rychlostí s „prvním odhadem větru“ a s posunutými odhady ( $\pm 2 \cdot v_{max}$ ,  $\pm 4 \cdot v_{max}$ )
- pokud je naměřená rychlost blíže k některému z posunutých odhadů je provedena patřičná korekce

# VAD Calculation

- „napasování“ VAD sinusovky do filtrovaných a de-aliasovaných dat radiálních rychlostí

$$v^*(\beta) = a_0^* + a_1^* \cos \beta - b_1^* \sin \beta$$

- výpočet horizontální a vertikální složky větru

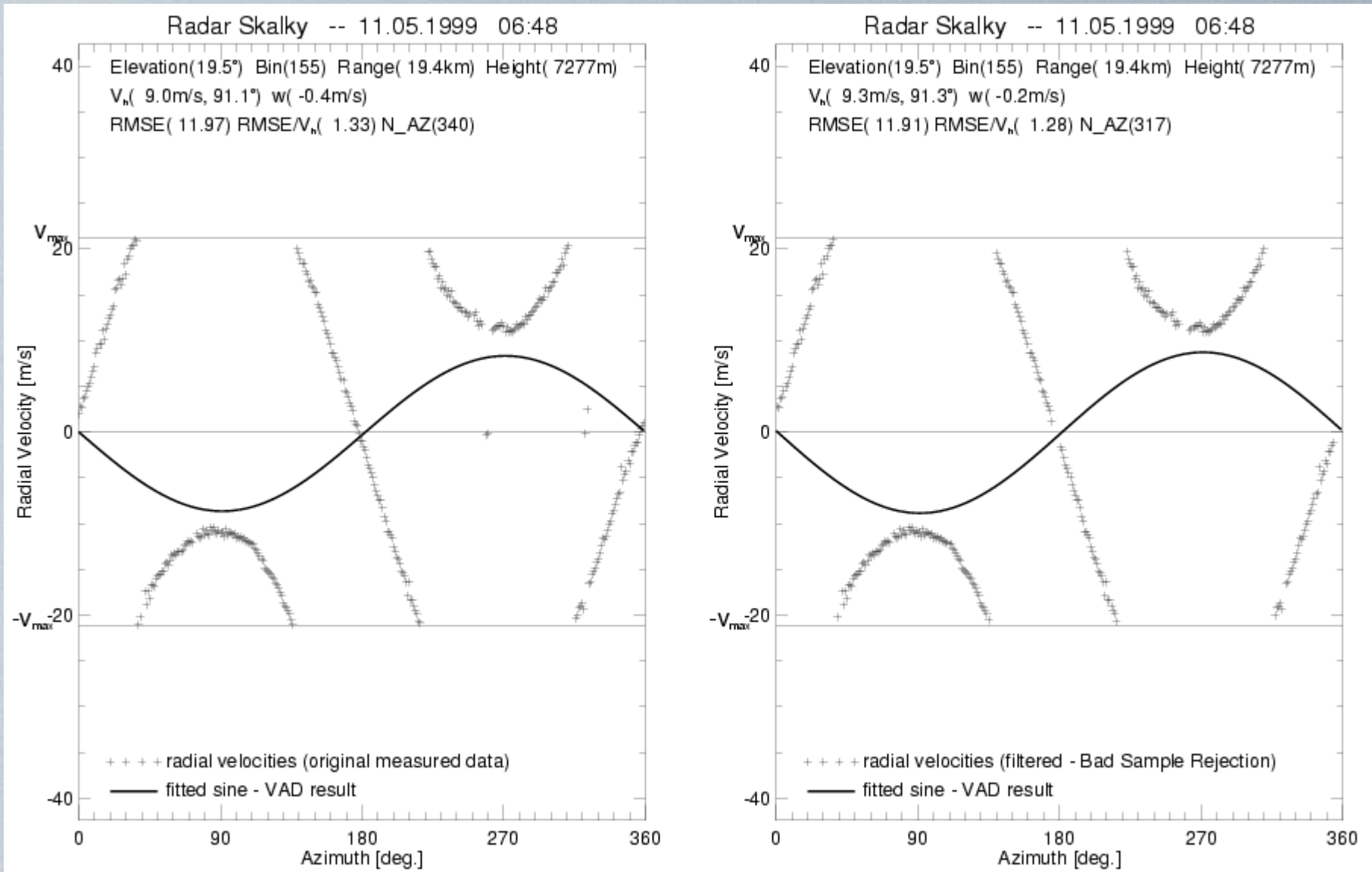
$$u_0 = \frac{-b_1^*}{\cos \alpha}, \quad v_0 = \frac{a_1^*}{\cos \alpha}$$

$$V_{h\_speed} = \sqrt{u_0^2 + v_0^2}$$

$$V_{h\_direction} = \left( \left( \frac{180}{\pi} \operatorname{atan}(u_0, v_0) + 180 \right) \bmod 360 \right)$$

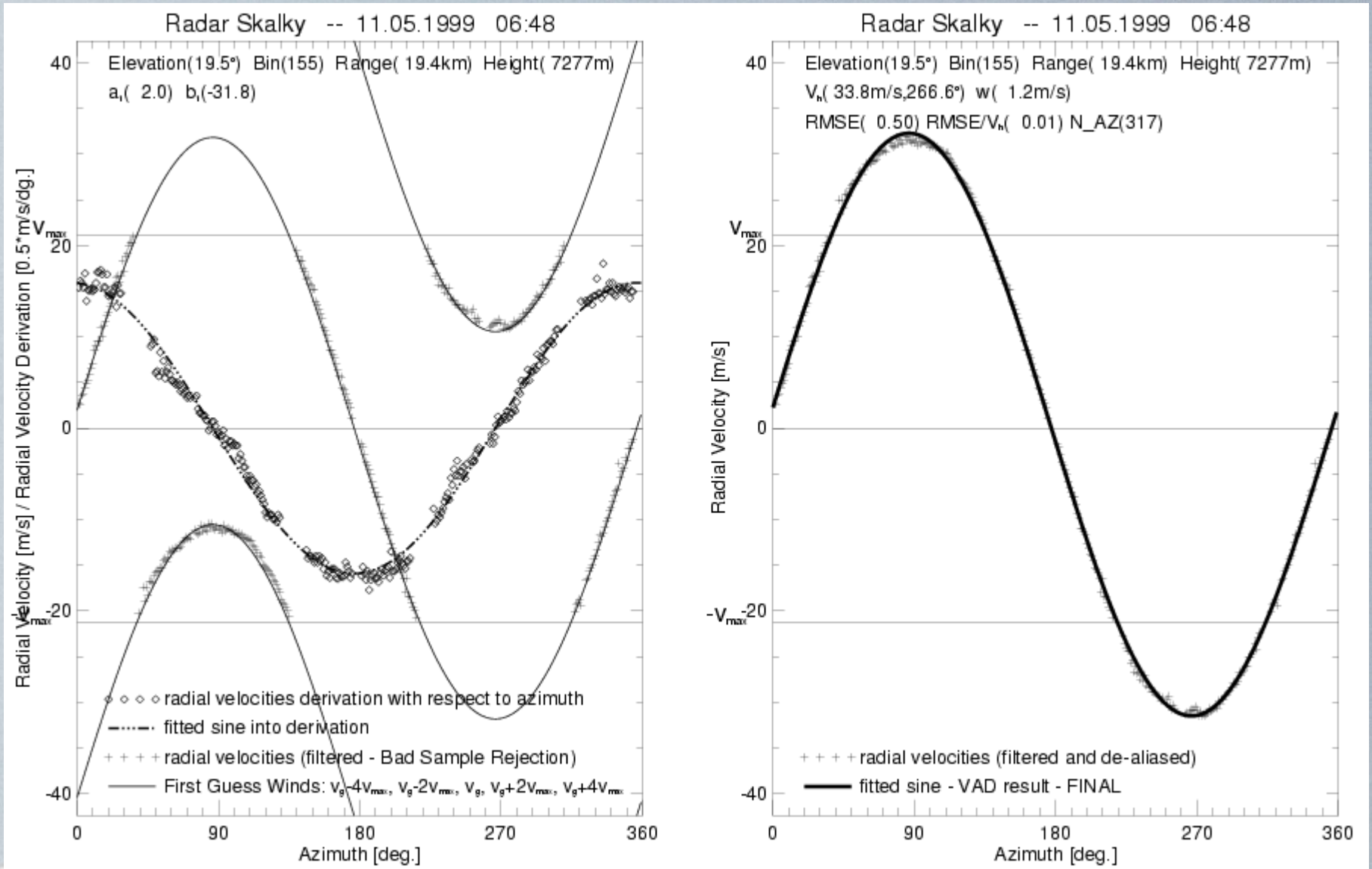
$$w = \frac{a_0^*}{\sin \alpha}$$

# Odmítnutí špatných dat radiálních rychlostí



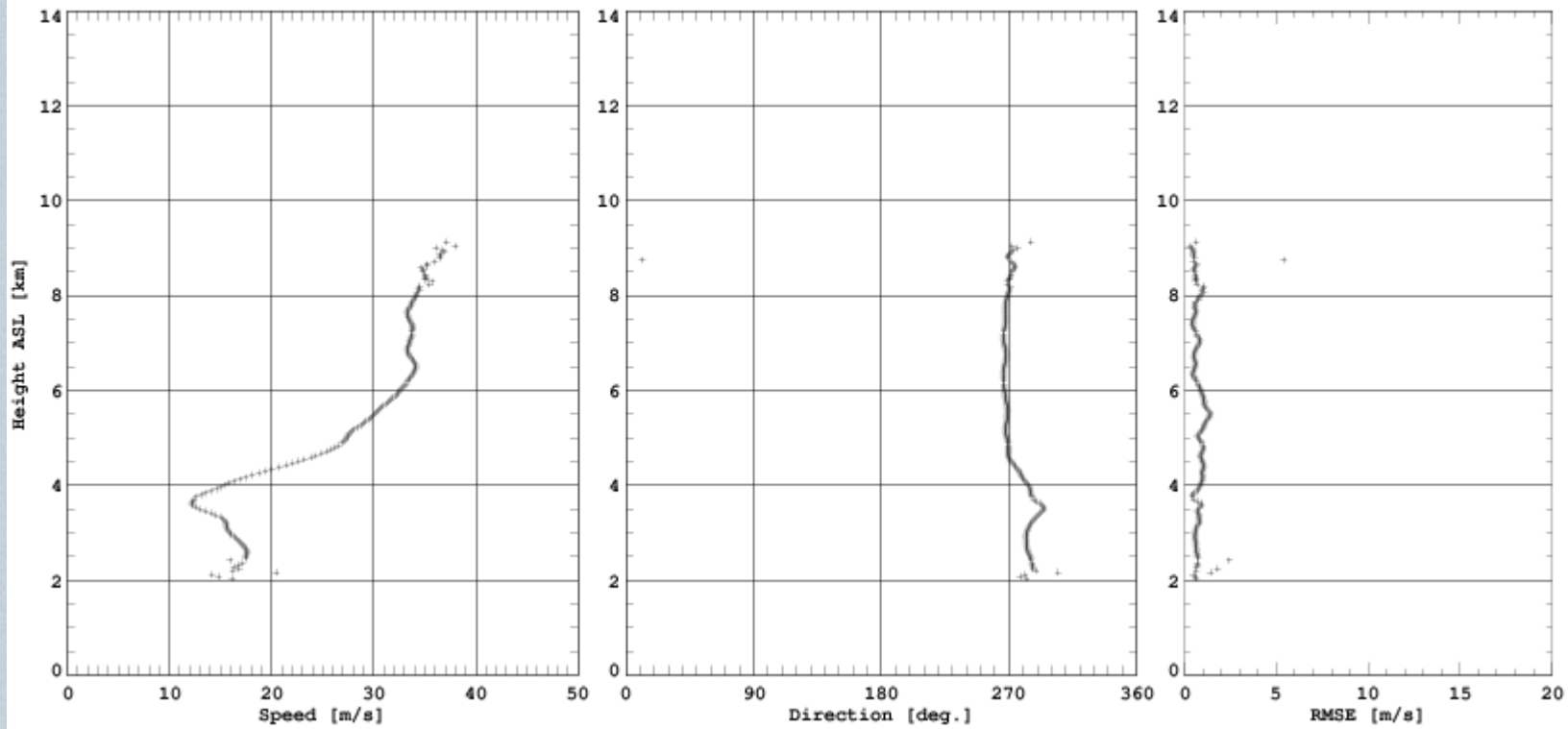


# De-aliasing radiálních rychlostí

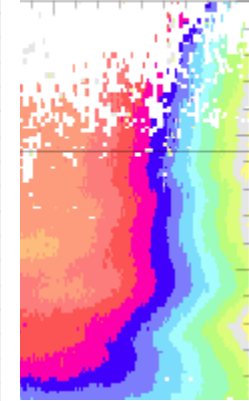


Radar Skalky - 11.05.1999 06:48 UT El: 19.5°

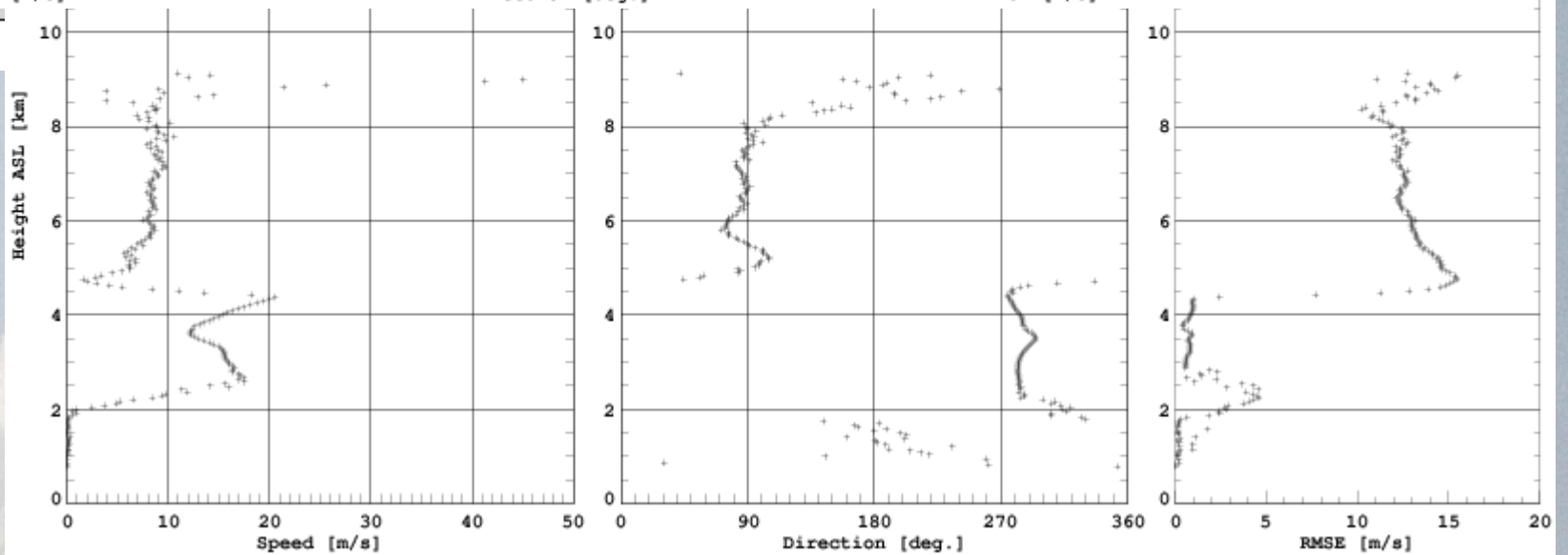
Vertical profile of horizontal wind - (VAD algorithm including BSR and velocity dealiasing)



Radar Skalky



ed data)

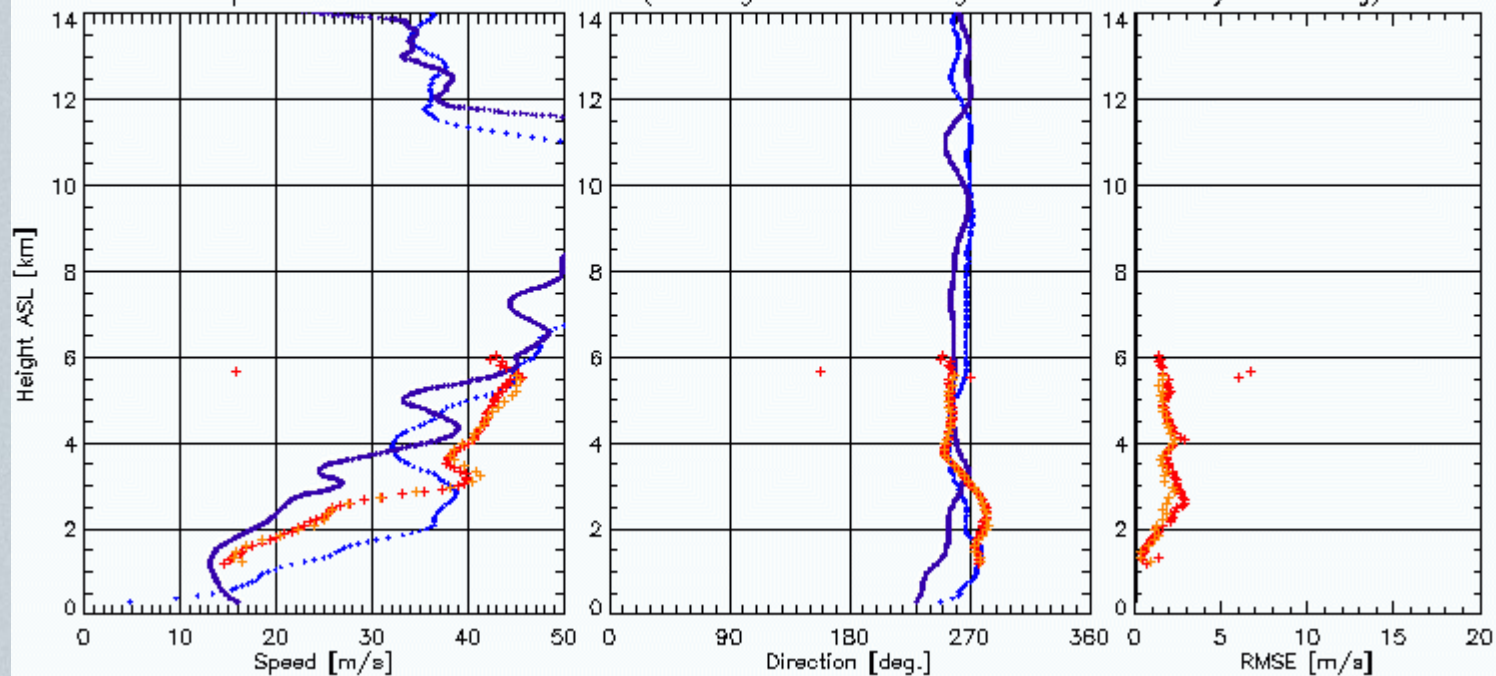


# VAD Data Display

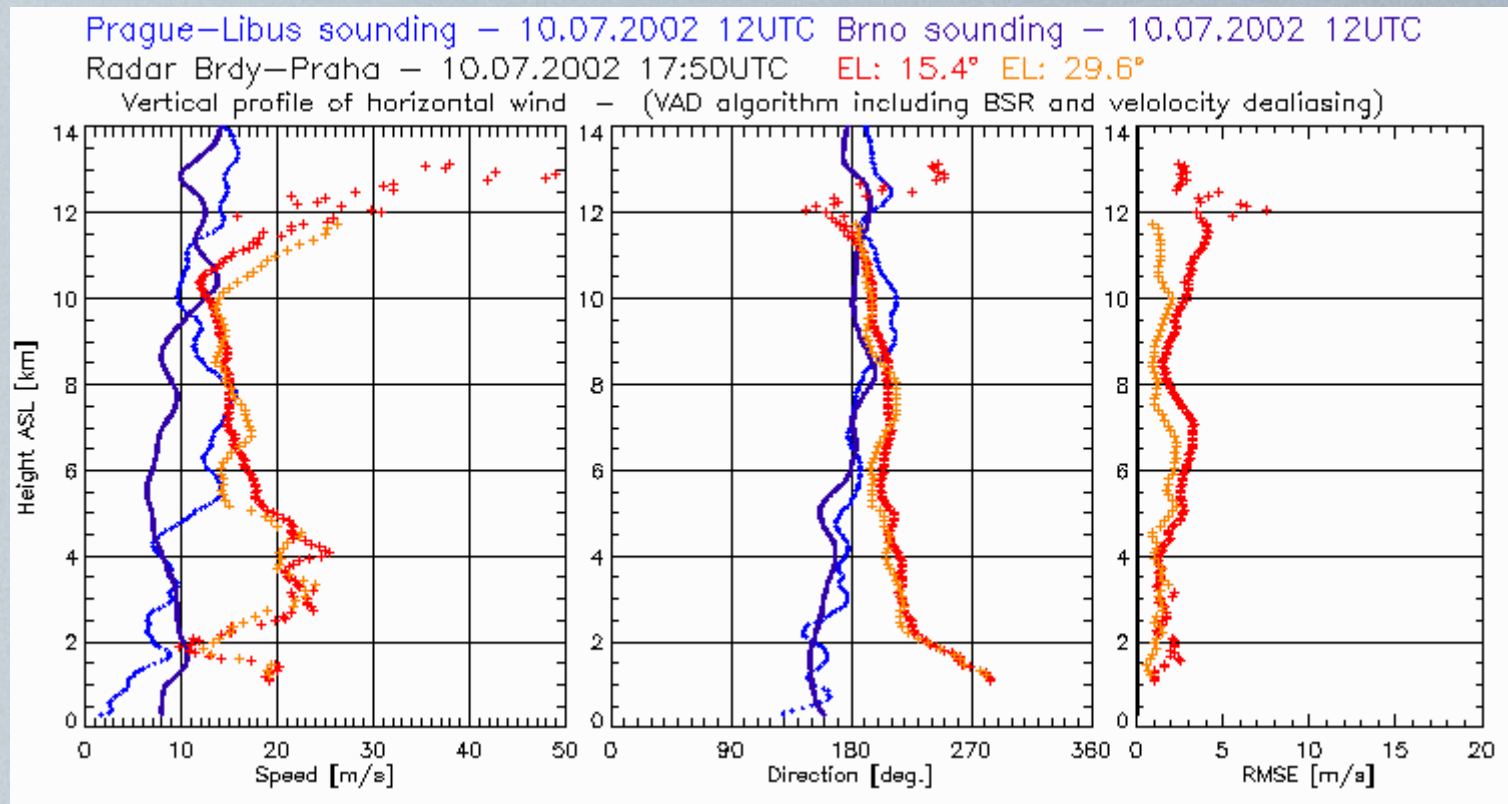
Prague-Libus sounding - 27.02.2002 12UTC Brno sounding - 27.02.2002 12UTC

Radar Brdy-Praha - 27.02.2002 14:30UTC EL: 15.4° EL: 29.9°

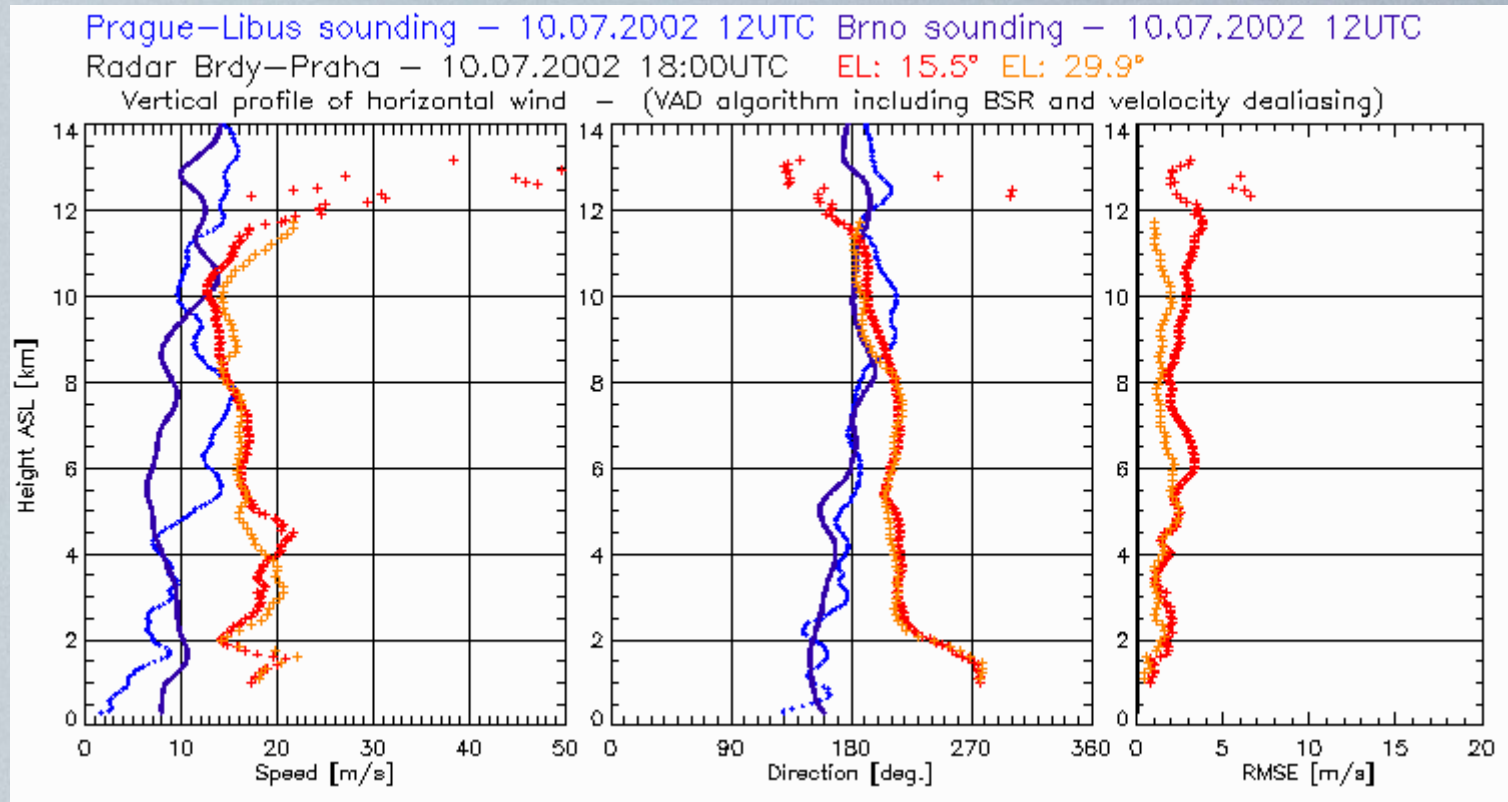
Vertical profile of horizontal wind - (VAD algorithm including BSR and velocity dealiasing)



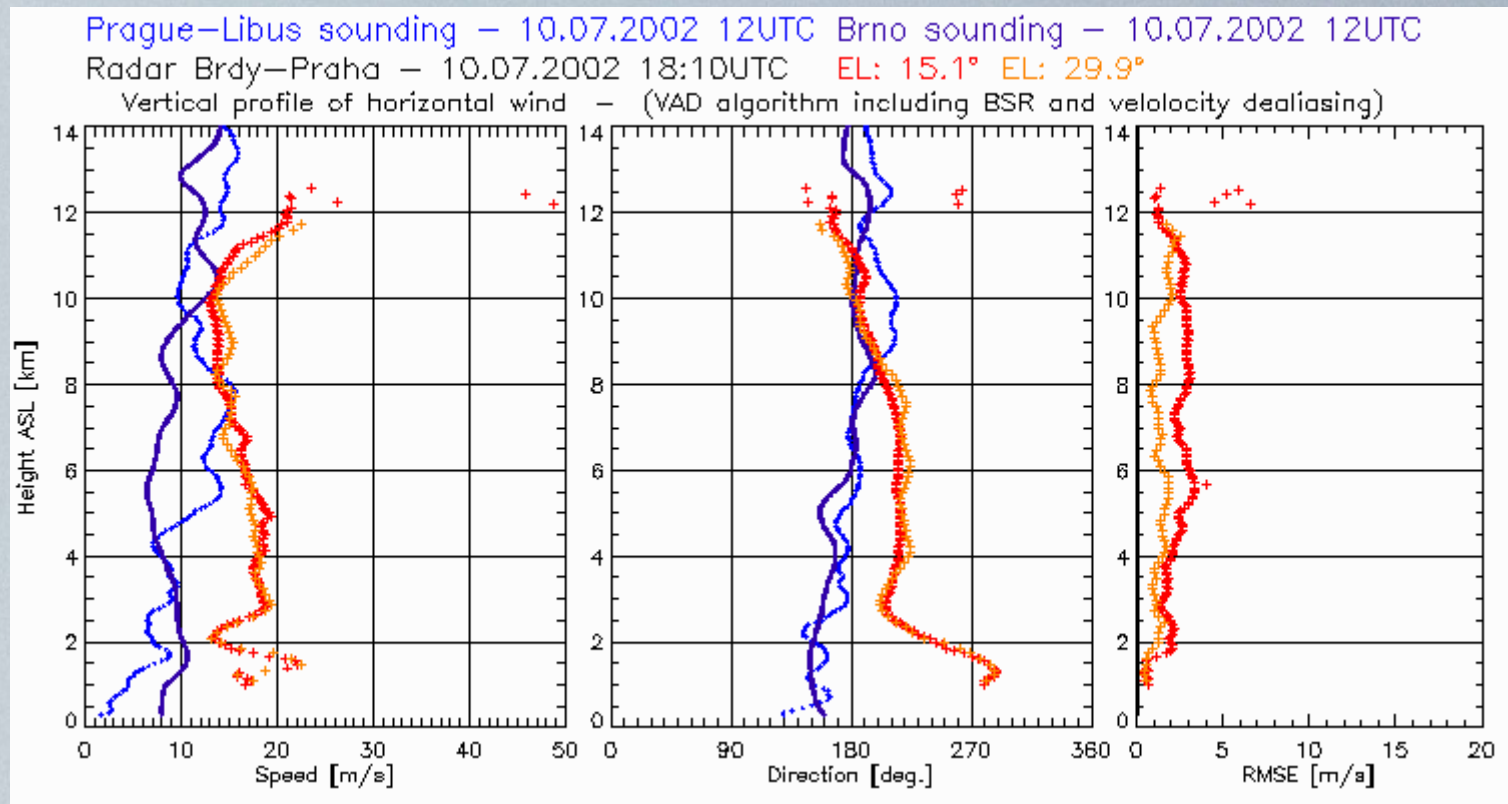
# VAD Data Display



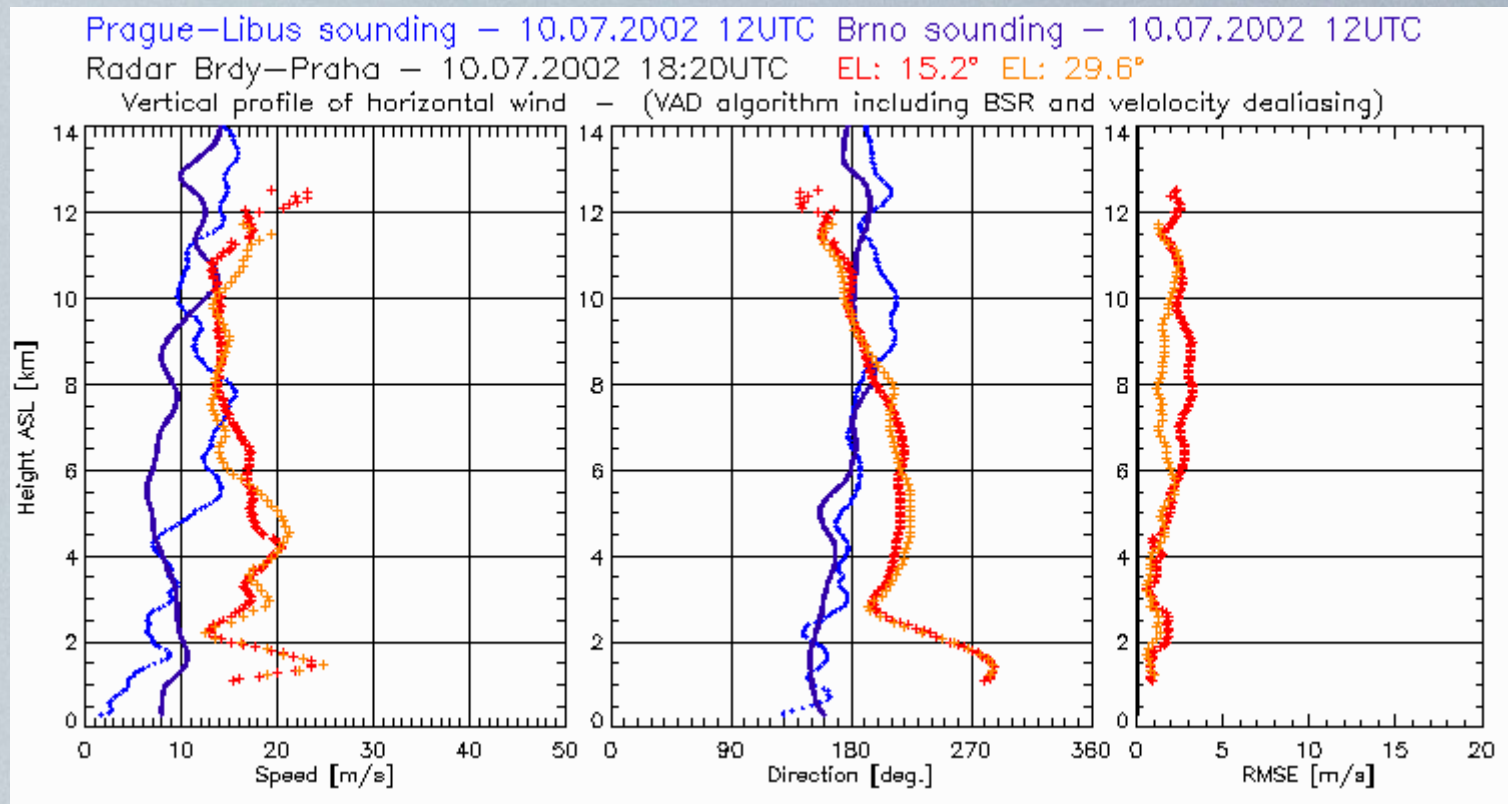
# VAD Data Display



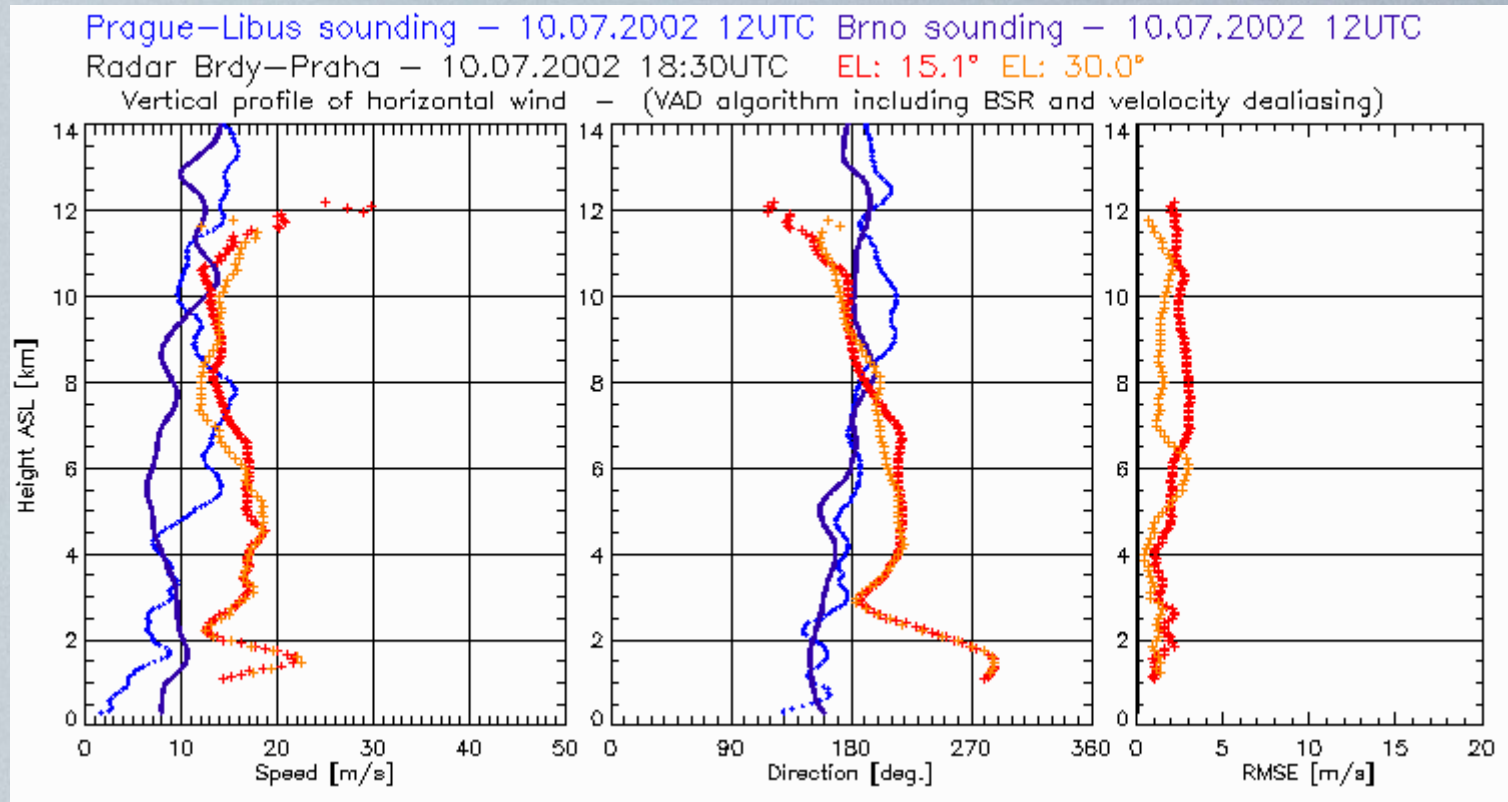
# VAD Data Display



# VAD Data Display

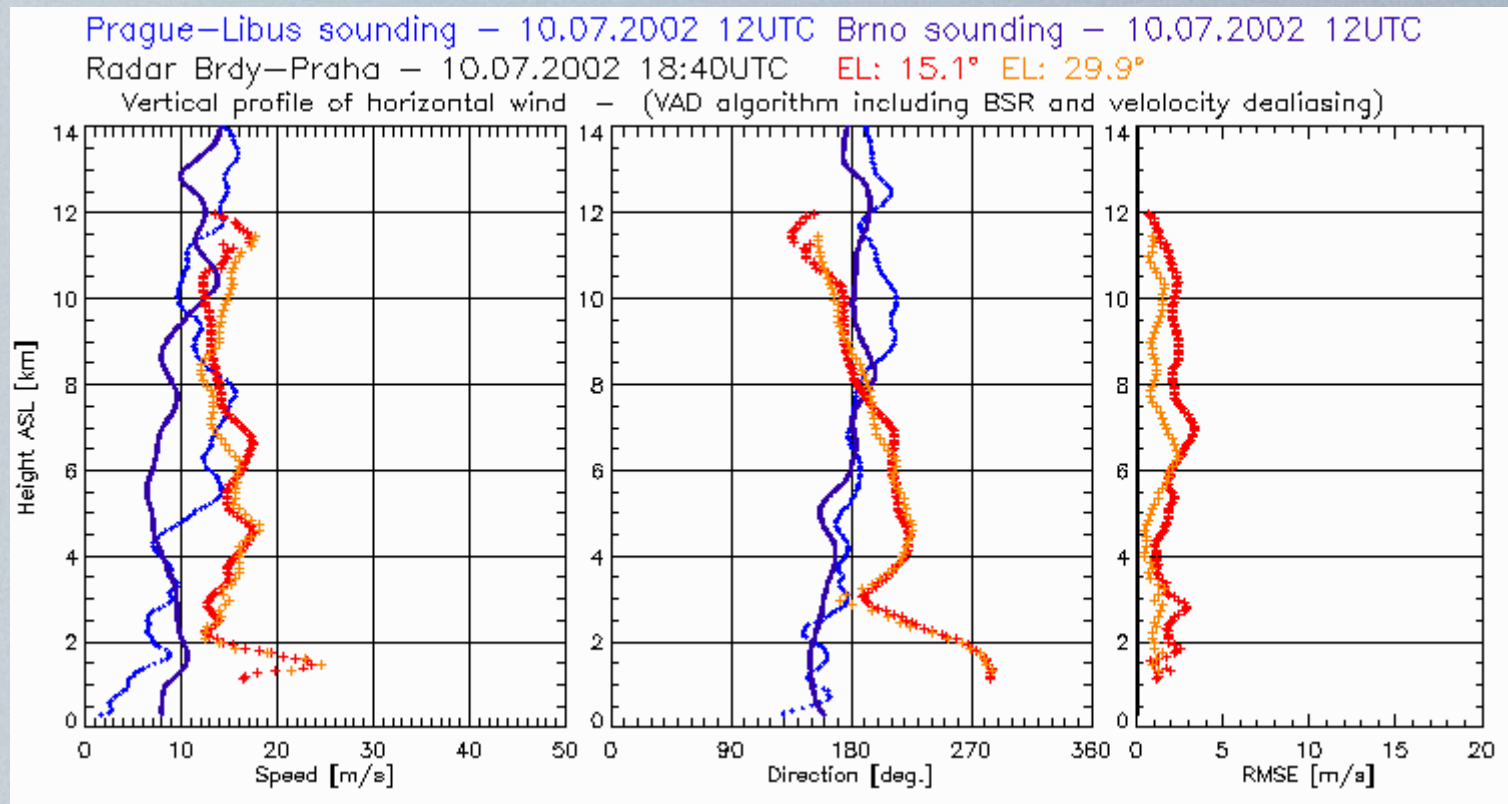


# VAD Data Display

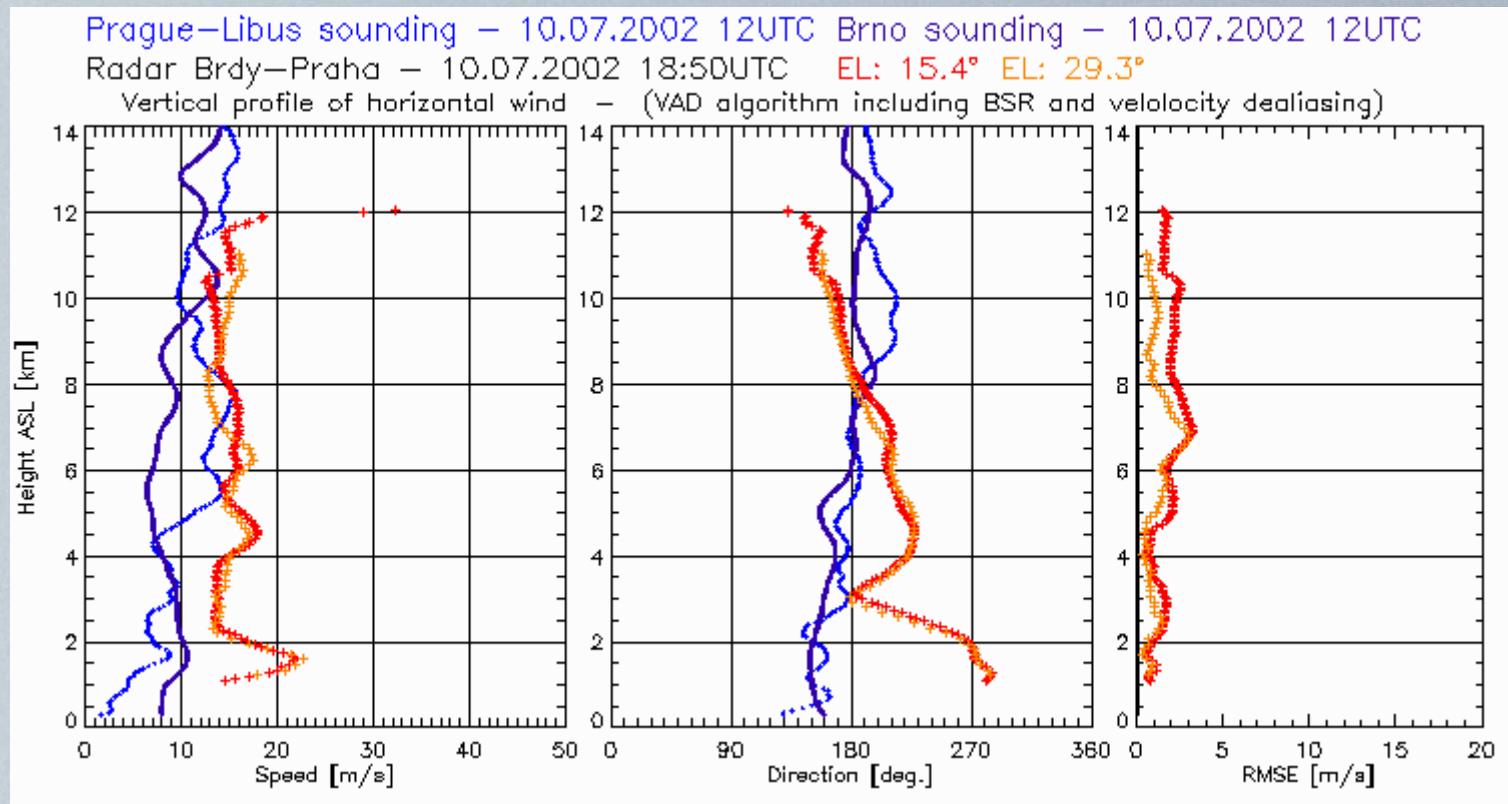




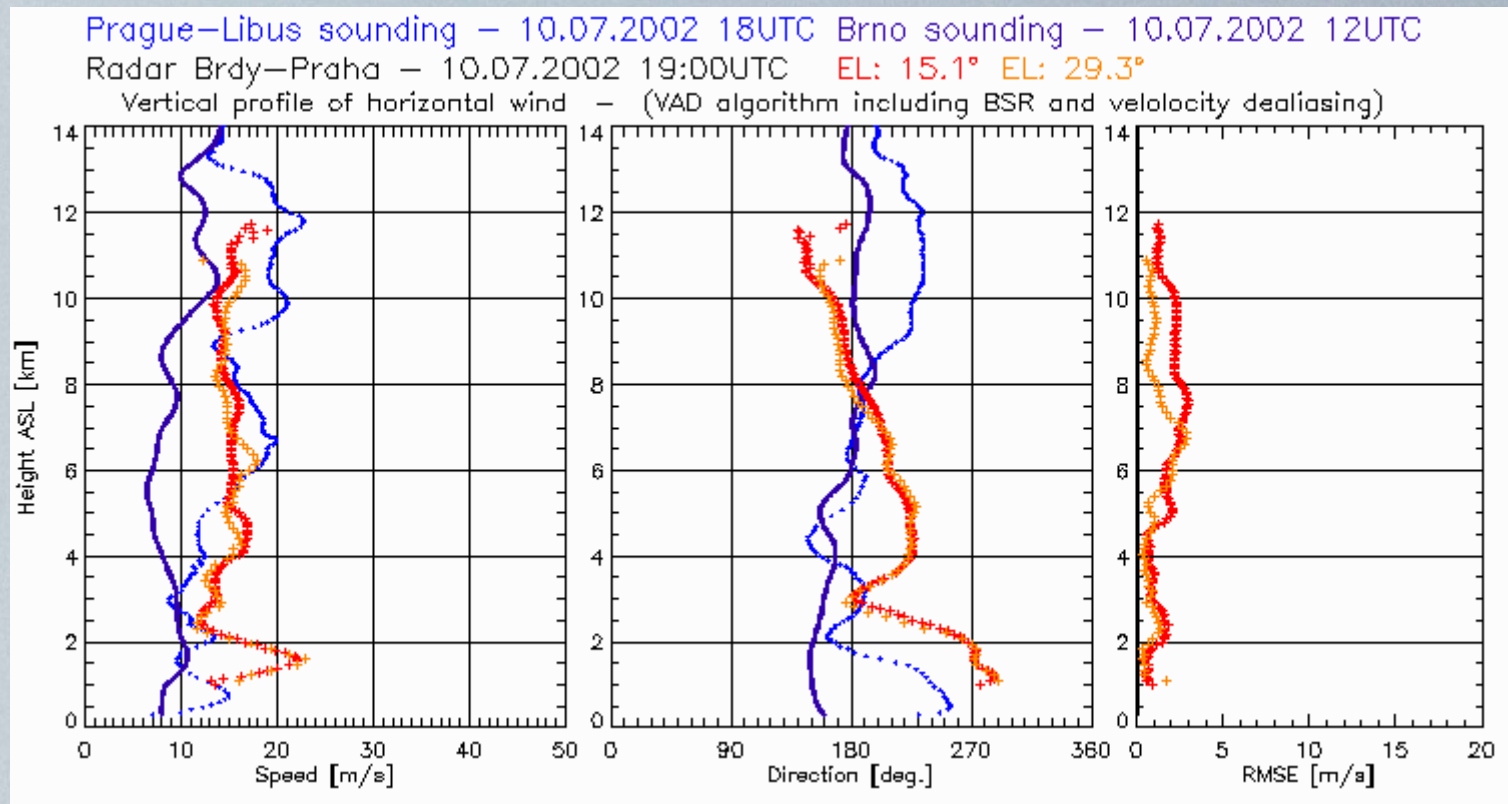
# VAD Data Display



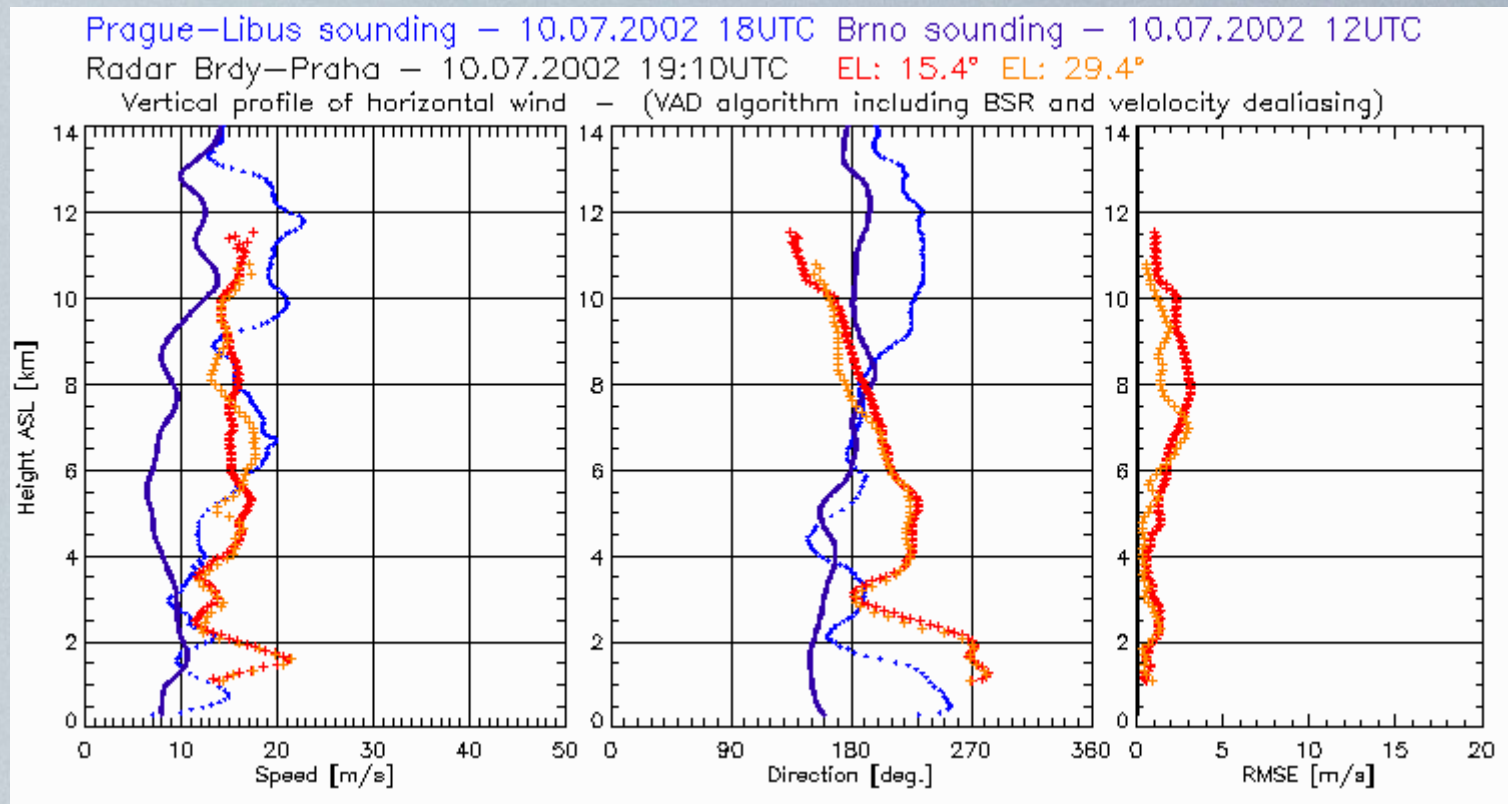
# VAD Data Display



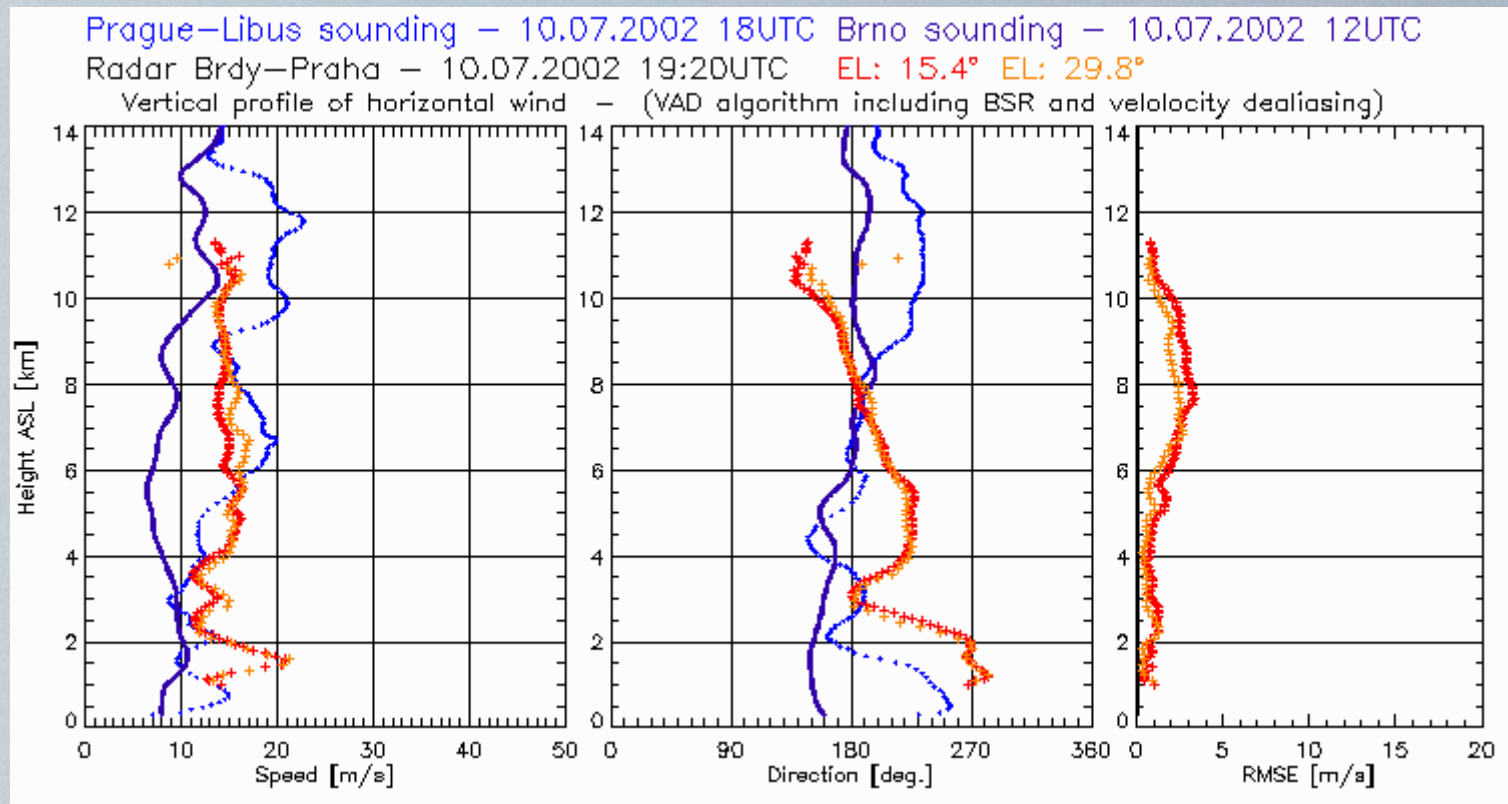
# VAD Data Display



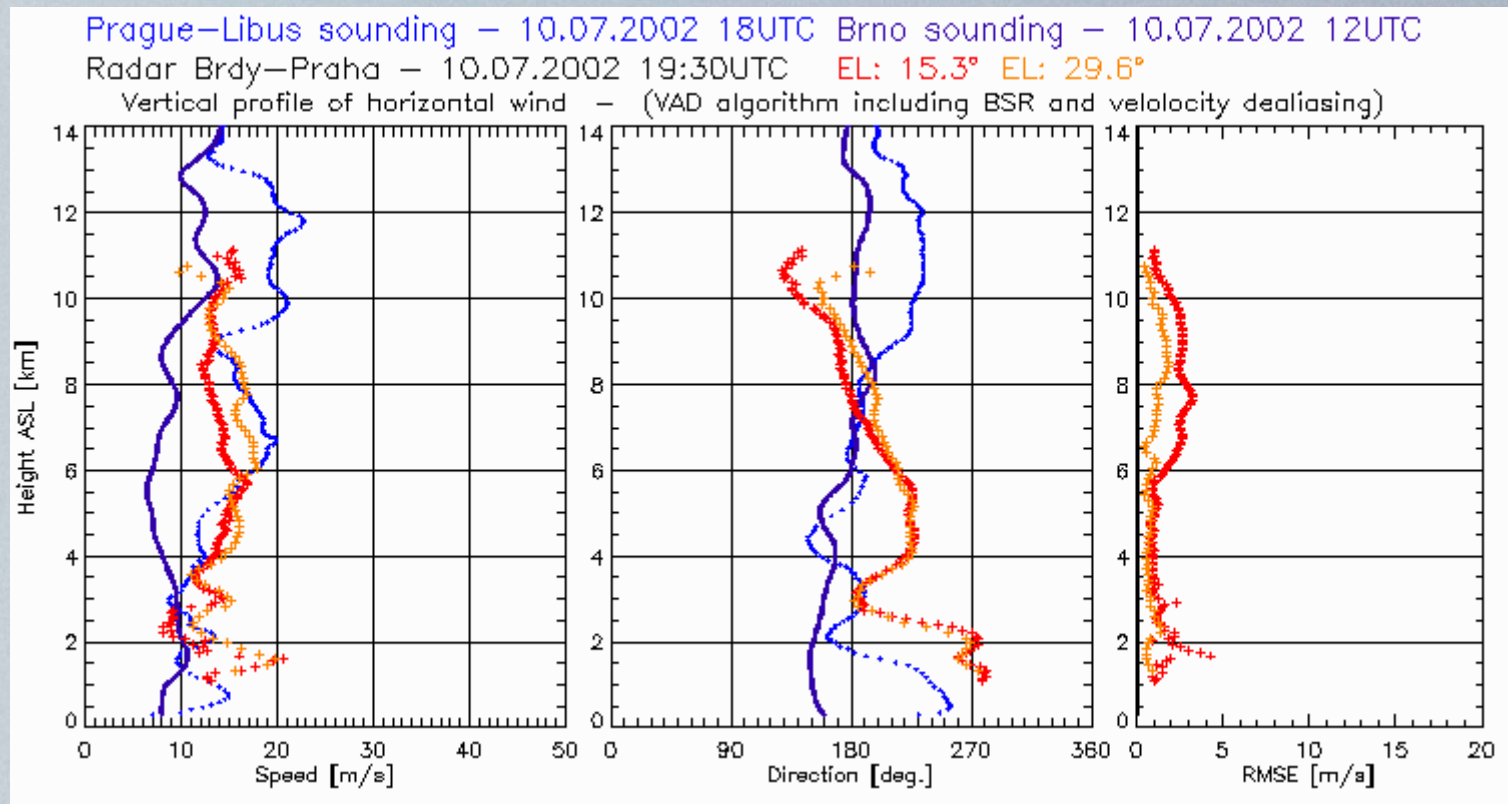
# VAD Data Display



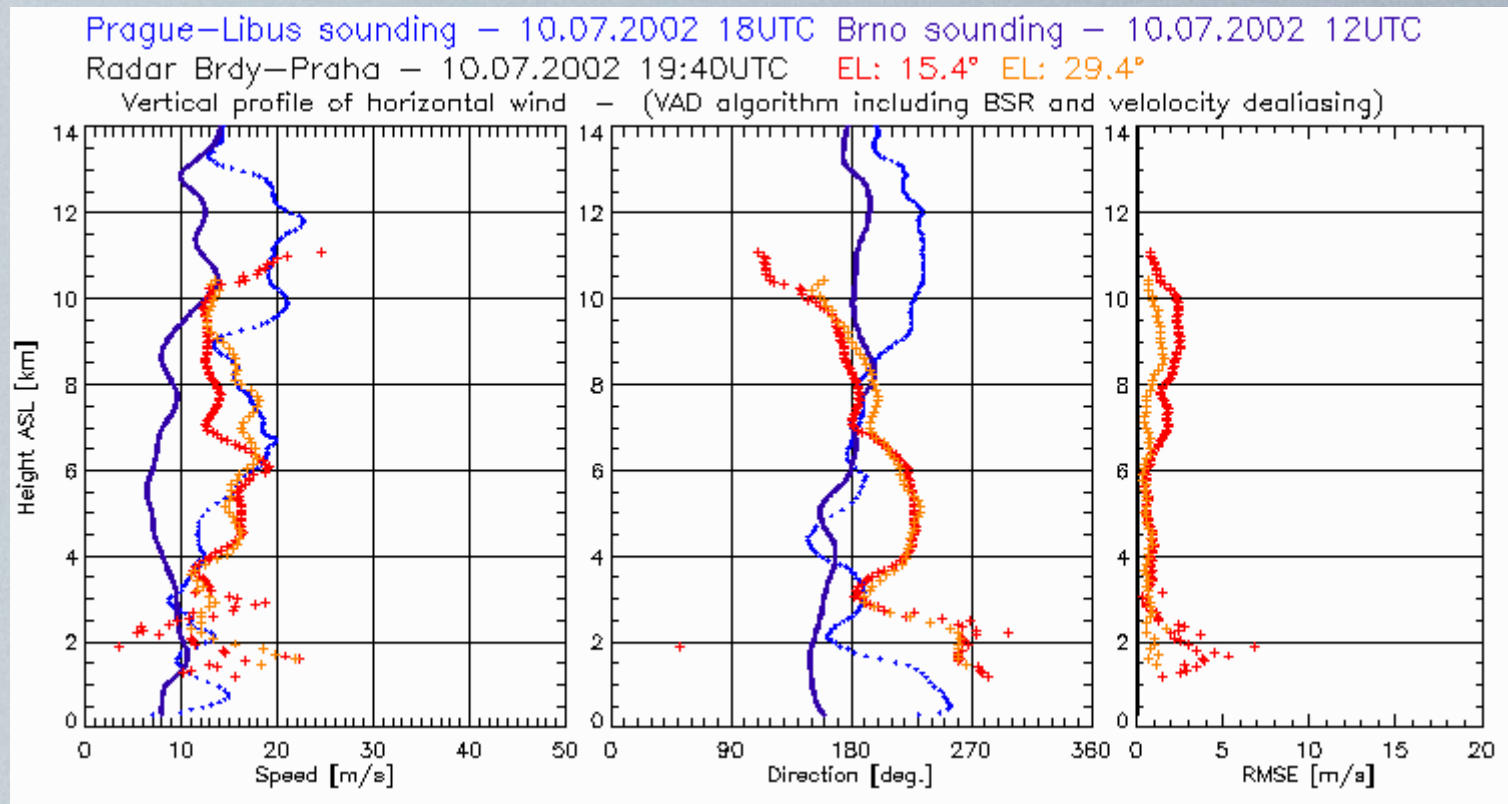
# VAD Data Display



# VAD Data Display



# VAD Data Display



# VAD vs. aerologická měření

- aerologická měření - základní nástroj - měří vždy a více prvků
- vertikální profil větru z VAD analýzy
  - doplňková informace k aerologickým měřím
  - možnost kontroly větru u aerologických měření
  - v současné době roste zájem z modelářské komunity o tato data jako vstup do asimilace NWP modelů (ECMWF,HIRLAM)
  - (+) lepší časové rozlišení (10 minut)
  - (+) zlepšuje prostorovou hustotu aerologických dat
  - (-) musí být k dispozici radarové cíle



# VAD Data Availability

