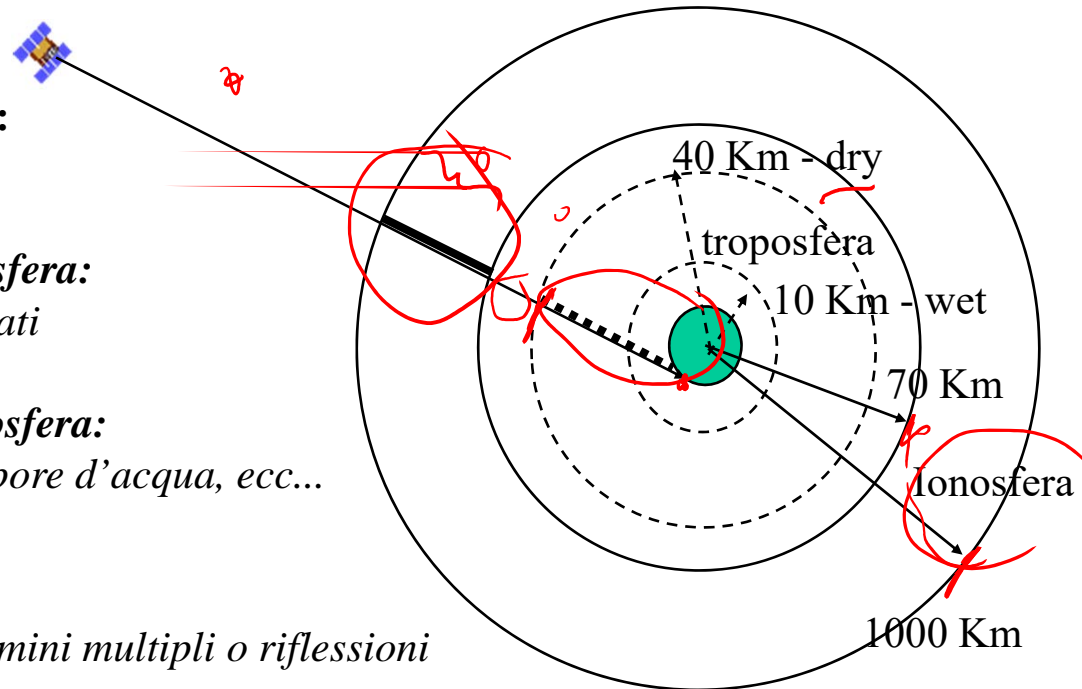

Effetto della propagazione sulla Radiolocalizzazione satellitare

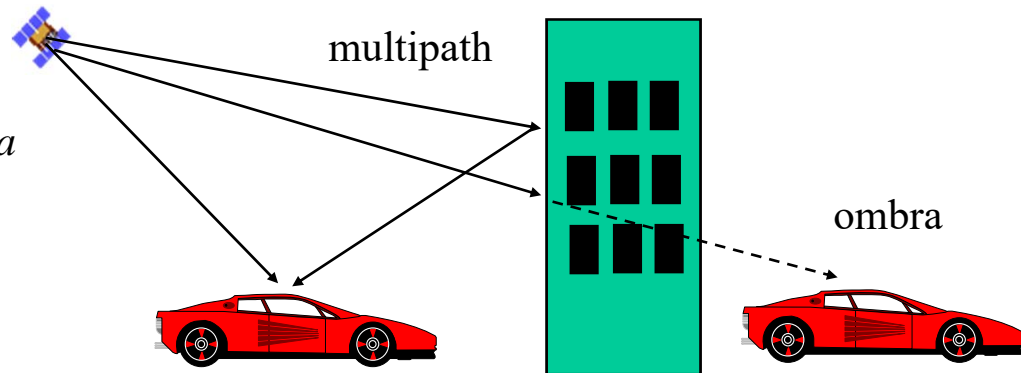
Errori dovuti alle osservazioni

- **Errori atmosferici:**
 - *propagazione nella ionosfera:*
densità di elettroni ionizzati
 - *propagazione nella troposfera:*
contributo di umidità, vapore d'acqua, ecc...

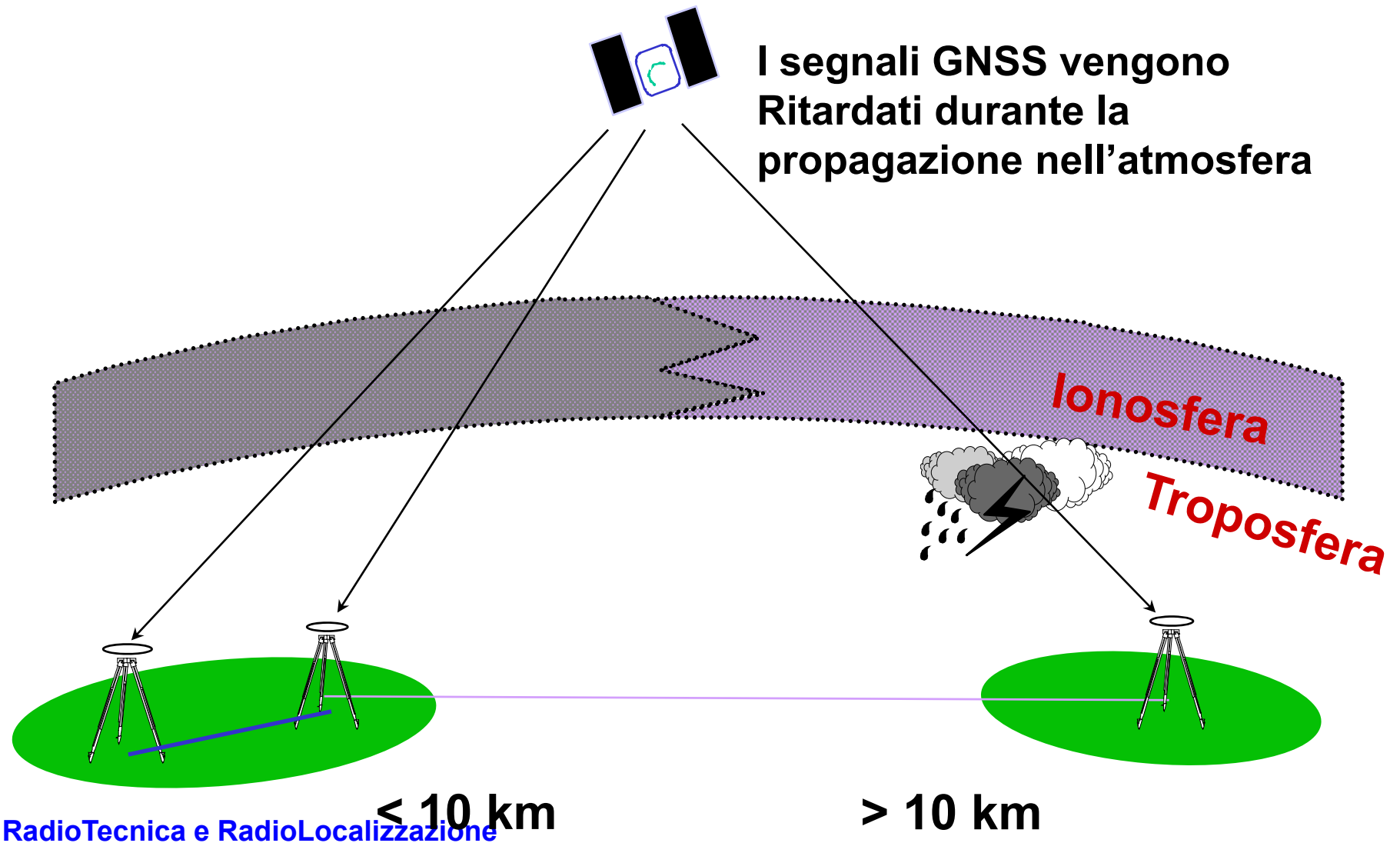


- **Multipath:** *cammini multipli o riflessioni*

- **Shadowing:** *zone di ombra*



Ritardo Atmosferico



Ritardo di propagazione

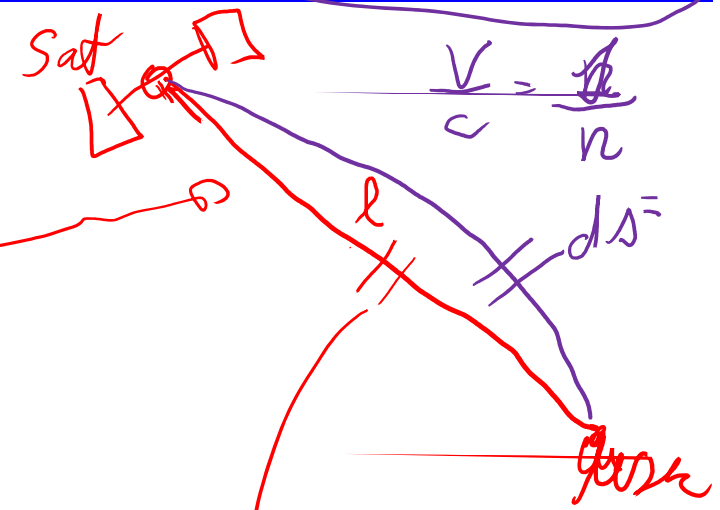
$$v dt = c \cdot \frac{v}{c} dt$$

range misurato:

$$S = \int_{SV}^{User} n ds$$

range line-of-sight

$$l = \int_{SV}^{User} dl$$



$$\frac{v}{c} = \frac{1}{n}$$

$$l = \int_{SV}^{User} dl = \int_{SV}^{User} c \cdot dt$$

$$* dl = c dt$$

$$S = \int ds = \int v \cdot dt = \frac{c}{n} dt$$

* ?

$$ds = \frac{c}{n} dt$$

$$\frac{n ds}{c} \neq dt$$

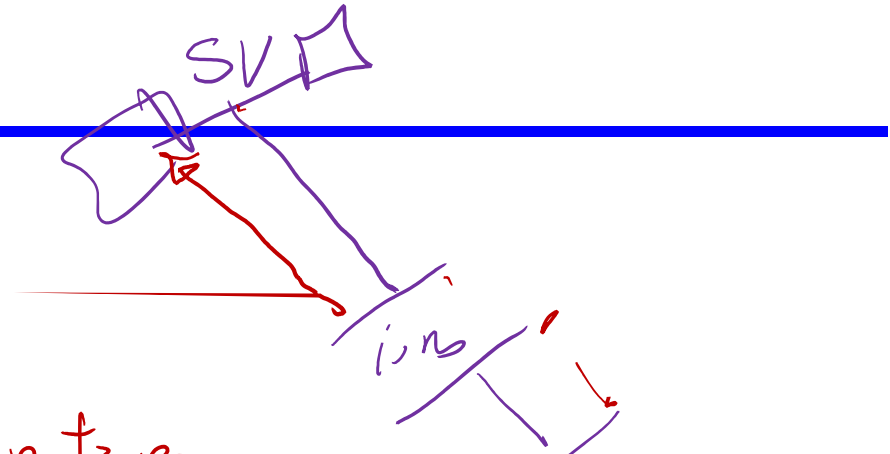
$$dl = c dt \rightarrow dt = \frac{dl}{c}$$

*
$$l = c \cdot \int_{SV}^{user} dt \approx c \cdot \int_{SV}^{user} \frac{1}{c} dl = \int_{SV}^{user} 1 \cdot dl \quad \checkmark \quad OK$$

$$ds = v dt = \frac{c}{n} dt \rightarrow dt = \frac{1}{c} n ds$$

$$S = c \cdot \int_{SV}^{user} dt = c \cdot \int_{SV}^{user} \frac{1}{c} n ds = \int_{SV}^{user} n ds \approx \int_{SV}^{user} n dl$$

$$\Delta S = \int_{SV}^{user} (n-1) dl =$$



$$= \int_{SV}^{top\ iono} (n-1) dl + \int_{top\ iono}^{bottom\ iono} (n-1) dl + \int_{bottom\ iono}^{top\ tropo} (n-1) dl + \int_{top\ tropo}^{user} (n-1) dl$$

\parallel
 \emptyset

\parallel
 ΔS_{iono}

\parallel
 \emptyset

\parallel
 ΔS_{tropo}

$$g(t) \rightarrow s(t) = g(t) e^{j 2\pi f_0 t}$$

$$n(f) = \frac{c'}{v(f)}$$

$$\downarrow$$

$$r(t) = s\left(t - \frac{d}{c}\right)$$

$$r(t) = s\left(t - \frac{d}{v(f)}\right) ?$$

$$G(f) \rightarrow \begin{array}{l} S(f) = G(f - f_0) \\ R(f) = G(f - f_0) e^{-j 2\pi f \frac{d}{v(f)}} \end{array}$$

$$G(f - f_0) e^{-j 2\pi f \frac{d}{c} n(f)}$$

$$n(f) \approx n(f_0) + n'(f_0) \cdot (f - f_0)$$

$$R(f) \approx G(f-f_0) e^{-j 2\pi \frac{f d}{c} \cdot [n(f_0) + n'(f_0) \cdot (f-f_0)]}$$

$$= G(f-f_0) e^{-j 2\pi \frac{d}{c} (f-f_0) [n(f_0) + n'(f_0) (f-f_0)]}$$

$$= e^{-j 2\pi \frac{d}{c} f_0 [n(f_0) + n'(f_0) (f-f_0)]}$$

$$r(t) = e^{-j 2\pi \frac{d}{c} f_0 n(f_0)} \times e^{j 2\pi f_0 t}$$

$$\mathcal{F}^{-1} \left\{ G(f) e^{-j 2\pi \frac{d}{c} f [n(f_0) + n'(f_0) \cdot f + f_0 n'(f_0)]} \right\}$$

$$r(t) = e^{+j 2\pi f_0 \left[t - \frac{d}{c} n(f_0) \right]}$$

$$\cdot \mathcal{F}^{-1} \left\{ G(f) \cdot e^{-j 2\pi f \frac{d}{c} [n(f_0) + f_0 n'(f_0)]} \cdot e^{+j 2\pi \frac{d}{c} f n'(f_0)} \right\}$$

$$r(t) = e^{j2\pi f_0 \left[t - \frac{d}{c} n(f_0) \right]} \cdot g \left[t - \frac{d}{c} \left[n(f_0) + f_0 n'(f_0) \right] \right]$$

$v(f) = \frac{c}{n(f)}$

~~\sqrt{f} $\left\{ e^{-j2\pi d f n'(f)} \right\}$~~

$$v_g = \frac{c}{n(f_0) + f_0 n'(f_0)} = \frac{c}{n_g(f_0)}$$

$$n_g(f_0) = n(f_0) + f_0 n'(f_0)$$

$$n(f_0) = 1 + \frac{C_2}{f_0^2} + \frac{C_3}{f_0^3} + \frac{C_4}{f_0^4}$$

$$f_0 n'(f_0) = 0 - \frac{2C_2 \cdot f_0}{f_0^3} - \frac{3C_3 \cdot f_0}{f_0^4} - \frac{4C_4 \cdot f_0}{f_0^5}$$

$$C_2 = -40,3 \text{ ne}$$

$$n(f) \approx n(f_0) + f_0 n'(f_0) = 1 - \frac{C_2}{f_0^2} - \frac{2C_3}{f_0^3} - \frac{3C_4}{f_0^4}$$

$$e^{j2\pi f_0 \left(t - \frac{d}{c}\right)}$$

→

$$e^{-j2\pi f_0 \frac{d}{c}} = e^{j2\pi \frac{d}{\lambda_0}}$$

$$d \rightarrow \lambda_0$$

$$e^{j2\pi f_0 \frac{\lambda_0}{c}}$$

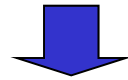
Errori atmosferici

- Errori atmosferici:

- *indice di rifrazione dipende dalla frequenza*

$$n(f) = \frac{c}{v(f)}$$

$$\begin{aligned} S(f) e^{-j2\pi f \frac{d}{c} n(f)} &= G(f - f_0) e^{-j2\pi f \frac{d}{c} n(f)} = \\ &\approx G(f - f_0) e^{-j2\pi \frac{d}{c} \{f_0 n(f_0) + [n(f_0) + f_0 n'(f_0)](f - f_0)\}} \end{aligned}$$



$$g\left(t - \left[n(f_0) + f_0 n'(f_0)\right] \frac{d}{c}\right) e^{j2\pi f_0 t} e^{-j2\pi f_0 n(f_0) \frac{d}{c}}$$

velocità di gruppo $v_g = c/n_g$

velocità di fase $v_p = c/n_p$



$$g\left(t - \left[n(f_0) + f_0 n'(f_0)\right] \frac{d}{c}\right) e^{j2\pi f_0 \left[t - n(f_0) \frac{d}{c}\right]}$$

Ritardo ionosferico (I)

* me 770 dispersive

- *propagazione nella ionosfera:*
densità di elettroni ionizzati n_e

$$n_p = 1 + \frac{c_2}{f^2} + \frac{c_3}{f^3} + \frac{c_4}{f^4} + \dots$$

$$n_p = 1 - \frac{40.3 n_e}{f^2}$$

$$n_g = n_p + f n'_g = 1 - \frac{c_2}{f^2} - \frac{2c_3}{f^3} - \frac{3c_4}{f^4} + \dots$$

$$n_g = 1 + \frac{40.3 n_e}{f^2}$$

range misurato:

$$S = \int_{SV}^{User} n ds$$

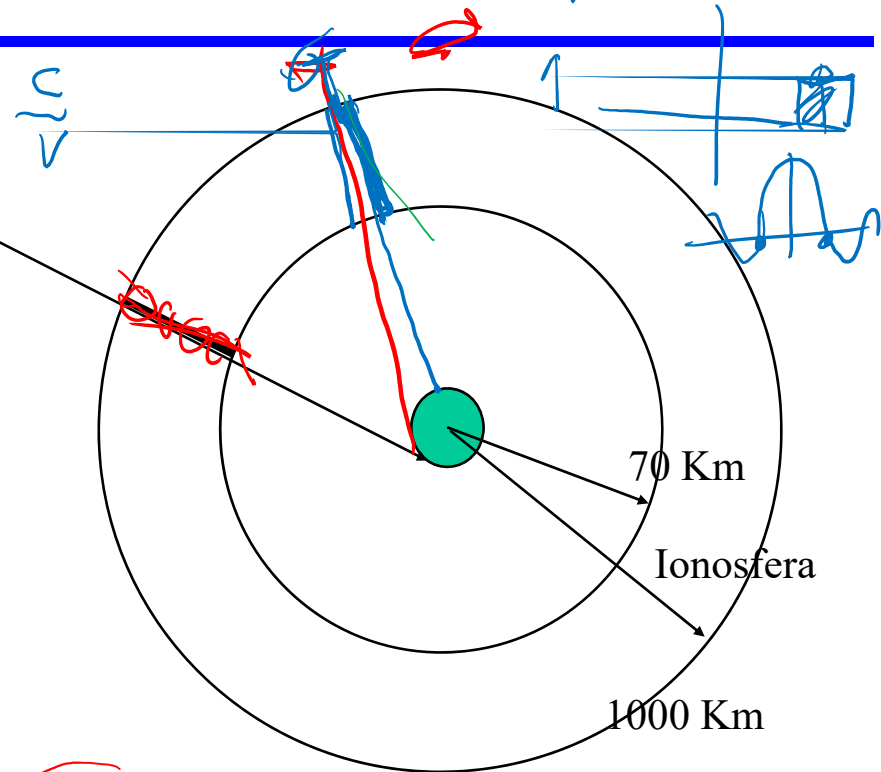
range line-of-sight

$$l = \int_{SV}^{User} dl$$

$$\Delta S_{iono} = \int_{SV}^{User} n ds - \int_{SV}^{User} dl \approx \int_{SV}^{User} n dl - \int_{SV}^{User} dl = \int_{SV}^{User} (n - 1) dl$$

$$\Delta S_{iono,p} = -\frac{40.3}{f^2} \int_{SV}^{User} n_e dl = -\frac{40.3}{f^2} F_{pp} \cdot TEC$$

$$\Delta S_{iono,g} = \frac{40.3}{f^2} \int_{SV}^{User} n_e dl = \frac{40.3}{f^2} F_{pp} \cdot TEC$$



Ritardo ionosferico (II)

- TEC= Total Electron Count (definito sulla verticale)

- *fattore di obliquità:*

$$F_{pp} = \sqrt{1 - \left(\frac{R_e \cos \phi}{R_e + h_I} \right)^2}$$

ϕ = angolo dallo zenith

h_I = altezza della massima densità di elettroni (valore usato nel WAAS= 400 Km)

Stima del ritardo ionosferico

$$\Delta S_{iono,corrL1} = \left(\frac{L_2^2}{L_2^2 - L_1^2} \right) (\rho_{L1} - \rho_{L2})$$

con $(f_1/f_2)^2 = (77/60)^2$

RadioTecnica e RadioLocalizzazione

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_{L1} = \rho + \Delta S_{ions}^{L1} \\ \rho_{L2} = \rho + \Delta S_{ions}^{L2} \end{array} \right.$$

$$\rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \rho_{L1} = \rho + \frac{40,3 F_{pp} \cdot TEC}{L_1^2} \\ \rho_{L2} = \rho + \frac{40,3 F_{pp} \cdot TEC}{L_2^2} \end{array} \right.$$

$$\rho_{L1} - \rho_{L2} = \frac{40,3 F_{pp} \cdot TEC}{L_1^2} - \frac{40,3 F_{pp} \cdot TEC}{L_2^2}$$

$$\rho_{L1,3} \text{ TEC} \approx \frac{\rho_{L1} - \rho_{L2}}{\frac{1}{L_1^2} - \frac{1}{L_2^2}}$$

$$\rho_{L1} = \rho + \frac{\rho_{L1} - \rho_{L2}}{\frac{1}{L_1^2} - \frac{1}{L_2^2}} \cdot \frac{1}{L_1^2}$$

$$\rho_{L1} = \rho - \frac{(\rho_{L1} - \rho_{L2})}{1 - \frac{L_1^2}{L_2^2}} = \frac{\frac{L_2^2}{L_1^2} \rho_{L1} + \rho_{L2}}{1 - \frac{L_1^2}{L_2^2}}$$

Ritardo troposferico

$$n = \frac{c}{v} = 1,0000 \times$$

$n = x$

- *propagazione nella troposfera:*
contributo di umidità, vapore d'acqua, ecc...

$$\Delta S_{tropo} = \int_{SV}^{User} (n-1) ds = 10^{-6} \int_{SV}^{User} N ds$$

$$N = 10^6 (n-1) = N_d(h) + N_w(h)$$

componente dry:

$$N_d(h) = N_{d,0} \left[\frac{h_d - h}{h_d} \right]^\mu$$

$$N_{d,0} = a_1 \frac{p_0}{T_0}$$

h_d : estensione superiore della zona dry

componente wet:

$$N_w(h) = N_{w,0} \left[\frac{h_w - h}{h_w} \right]^\mu$$

$$N_{w,0} = a_2 \frac{e_0}{T_0} + a_3 \frac{e_0}{T_0^2}$$

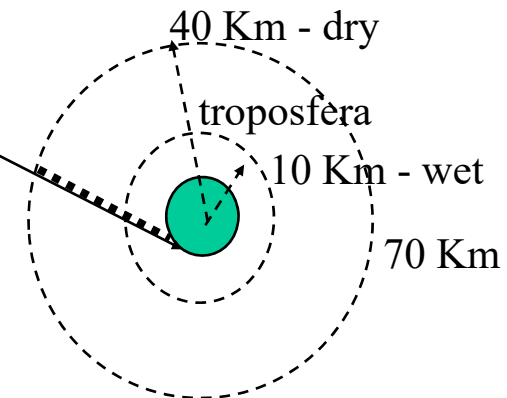
h_w : estensione superiore della zona wet

p_0 = pressione parziale della componente secca (mbar) al livello del mare

T_0 = temperatura assoluta (K) al livello del mare

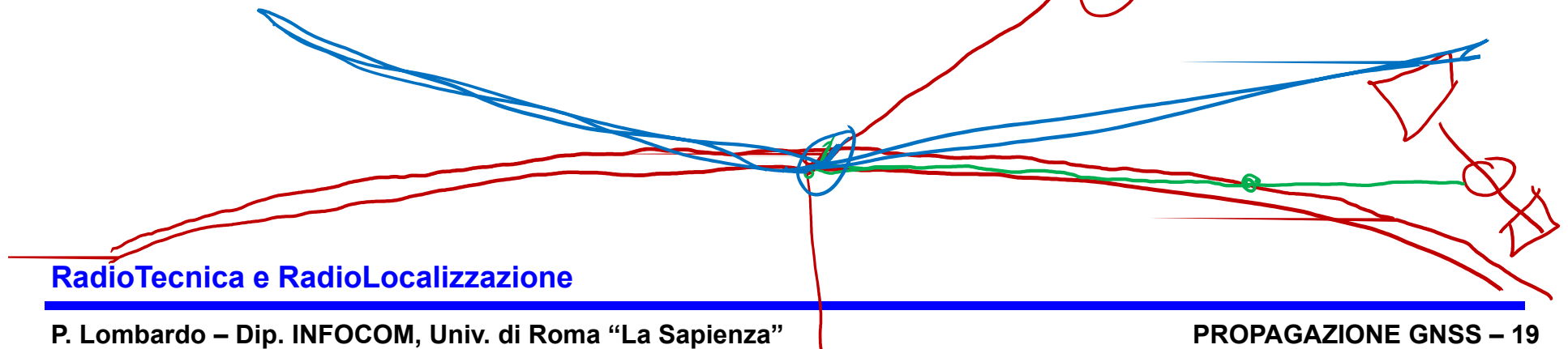
costanti empiriche: $a_1 = 77.624 \text{ K/mbar}$, $a_2 = -12.92 \text{ K/mbar}$, $a_3 = 371,900 \text{ K}^2/\text{mbar}$, $\mu = 4$

e_0 = pressione parziale di vapore d'acqua al livello del mare (mbar)



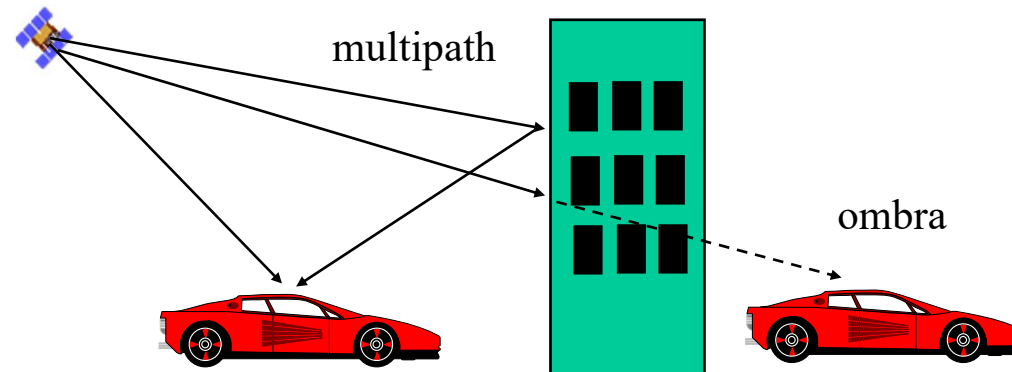
Satellite Mask Angle

- Il ritardo troposferico è maggiore per satelliti a bassi angoli di elevazione poiché il segnale deve attraversare una maggiore porzione di troposfera.
- C'è un compromesso nella scelta dell'angolo di mascheramento: più si sceglie alto, più diminuisce il ritardo ionosferico, ma diminuisce anche il numero di satelliti in visibilità e cresce il DOP

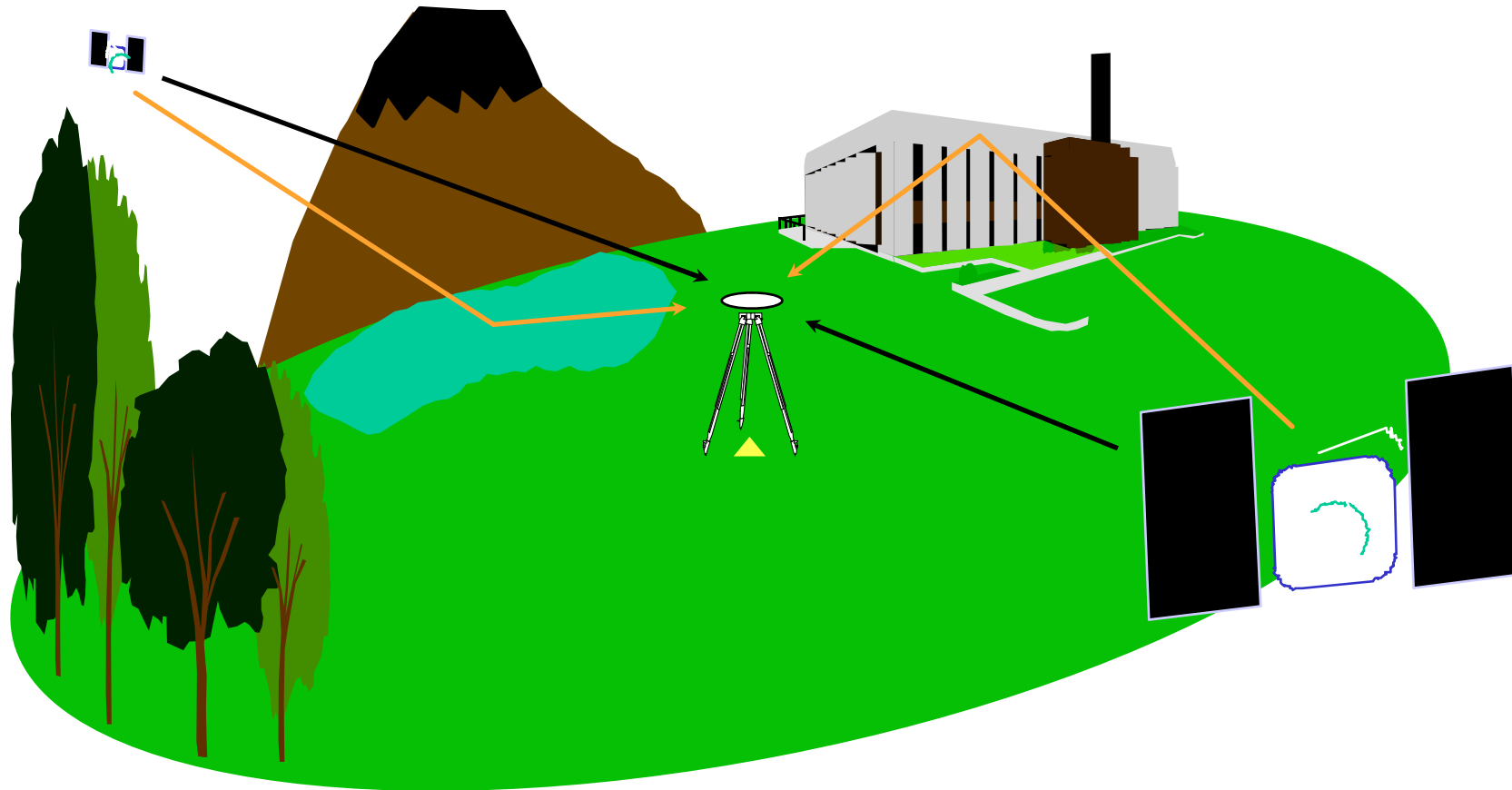


Errori dovuti alle osservazioni (II)

- **Multipath:** *cammini multipli o riflessioni*
- **Shadowing:** *zone di ombra*



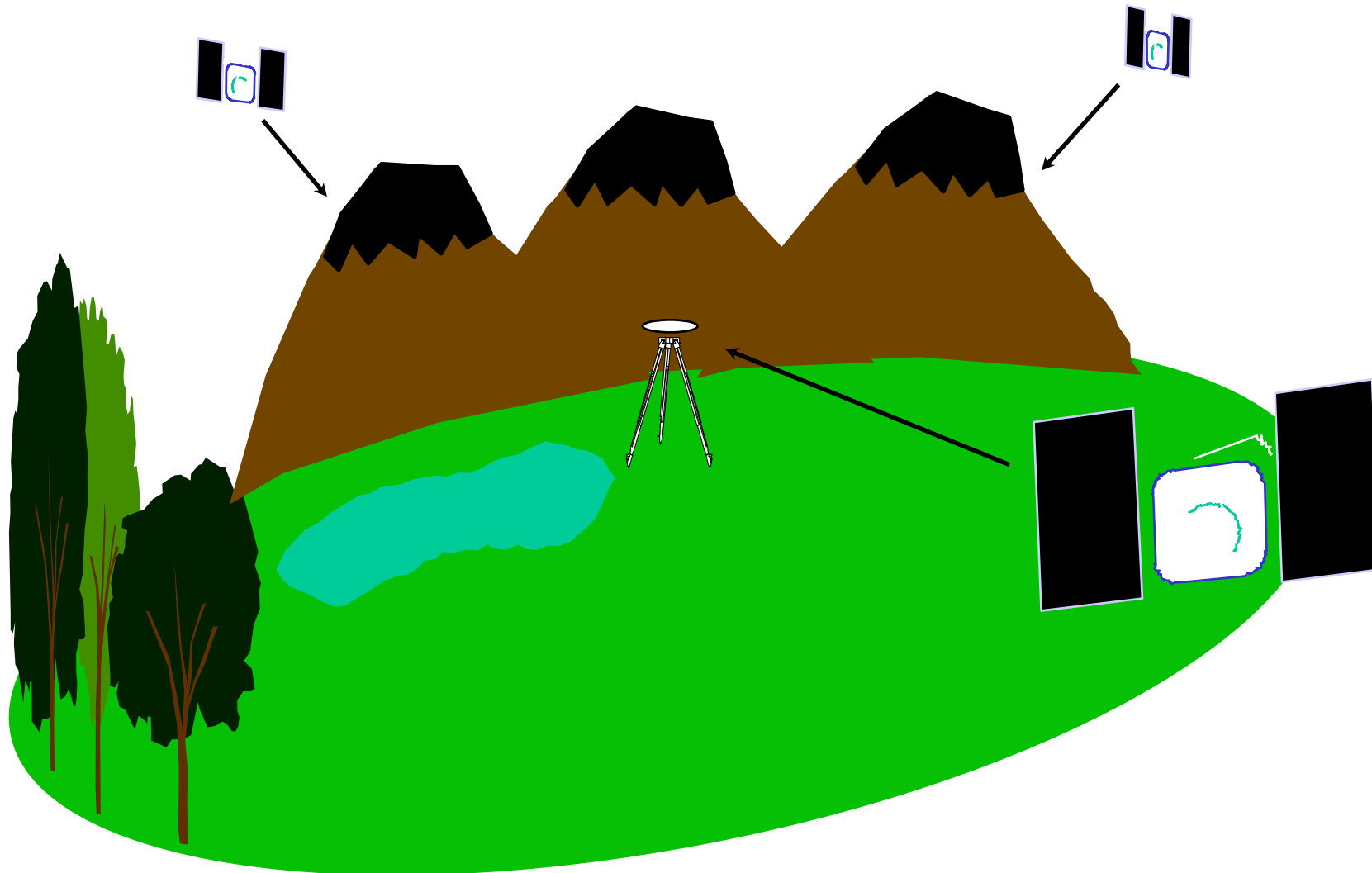
Multipath



Multi-Path Error

- Si presenta quando i segnali GNSS vengono riflessi ed il ricevitore rivela due segnali invece di uno soltanto in tempi diversi. Ciò causa confusione in ricevitori di basso livello, ma in genere è facile da correggere.
- Ricevitori di alto livello copmpensano il multipath
- Molti sistemi di misura usano soluzioni hardware: antenne con schermi o schemi di cancellazione del multipath

Obstruction



Ostruzione del segnale

- Si verifica quando qualche corpo blocca la propagazione del segnale GNSS.
- Aree con grande differenza di altezza
 - Canyons
 - Mountain Obstruction
 - Urban Environments
- Indoors