

La señal entre el satélite y el receptor

E. Calero

UPM

Madrid

2005

Ionosfera

Troposfera

Pérdida de ciclos

Multitrayectoria

La atmósfera

- Es el nombre aceptado para denominar la masa gaseosa que envuelve a los mares y continentes.
- Está sometida a la acción de dos campos terrestres : el gravitatorio y el magnético.
- La acción del campo gravitatorio decrece con la altitud.
- La acción del campo magnético crece con la altitud.
- La radiación solar y la terrestre también actúan sobre ella.
- Afecta tanto a las medidas geodésicas terrestres como a las espaciales.
- El grado de influencia de la atmósfera sobre las medidas geodésicas depende del tipo de medida.
- Si la atmósfera está en equilibrio, las superficies isobáricas e isotermas son superficies de nivel del campo gravitatorio terrestre. (Mecánica de fluidos) . Validez con reservas en las zonas próximas a la superficie terrestre.

La atmósfera

Eliminación de su influencia en las medidas

- **Modelo paramétrico**

- Modelo físico que permite cuantificar la influencia de la atmósfera en los observables a partir de medidas de magnitudes físicas complementarias: temperatura del aire, presión atmosférica, presión parcial del vapor de agua, ...
- La observación de estas magnitudes debe ser tan cuidadosa como la del fenómeno principal

- **Procedimiento de observación**

- Cuando no sea posible disponer de un modelo paramétrico que permita cuantificar la influencia de la atmósfera, el procedimiento de observación debe establecerse de manera que las variaciones que la atmósfera introduce en los observables se compensen de la mejor manera posible.

La atmósfera

Capas atmosféricas

- Troposfera (0 a 10Km)
 - Composición : (78% de N₂, 21% de O₂, 0.98% A, 0.03% de H₂O(vapor), CO₂, Ne, He, Kr, H₂, Xe, O₃)
 - Gradiente de temperatura : -7°K/Km a -10°K/Km
 - Inversiones del gradiente en las proximidades del suelo en determinadas condiciones.
 - Sede de la mayoría de los fenómenos meteorológicos
- Tropopausa (10 a 15 Km)
 - Cesa el descenso de la temperatura. Capa de inversión.

La atmósfera

Capas atmosféricas

- Estratosfera (15 - 50 Km.)
 - Temperatura creciente
 - Presencia de trazas de ozono que absorben la radiación ultravioleta cediendo calor
- Estratopausa
- Mesoesfera (50 - 90 Km.)
 - Temperatura decreciente
 - En el límite 130° a 150°K
- Mesopausa

La atmósfera

Capas atmosféricas

- Ionosfera (50 Km - 1500 Km...)
 - Crecimiento brusco de la ionización del aire a partir de los 80 Km.
 - Presencia de electrones libres y átomos y moléculas con carga eléctrica
 - Capa D. (80 a 100 Km)
 - Gran poder de absorción de ondas electromagnéticas
 - Capaz de reflejar las ondas largas y muy largas
 - Ionización producida por la radiación solar (Lyman 1216 Å) actuando sobre el oxígeno molecular, la absorción depende de la altura del Sol, por la noche casi desaparece.

La atmósfera

Capas atmosféricas: Ionosfera

– Capa E (100 a 120 Km)

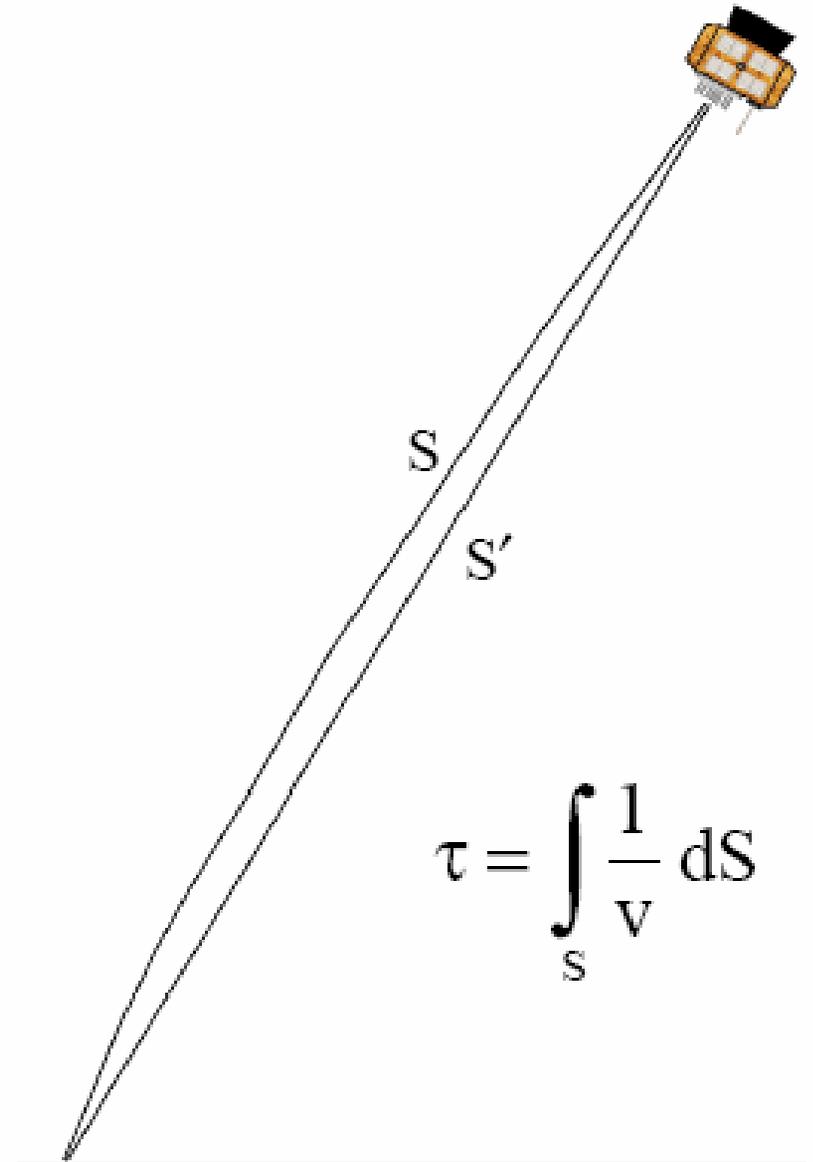
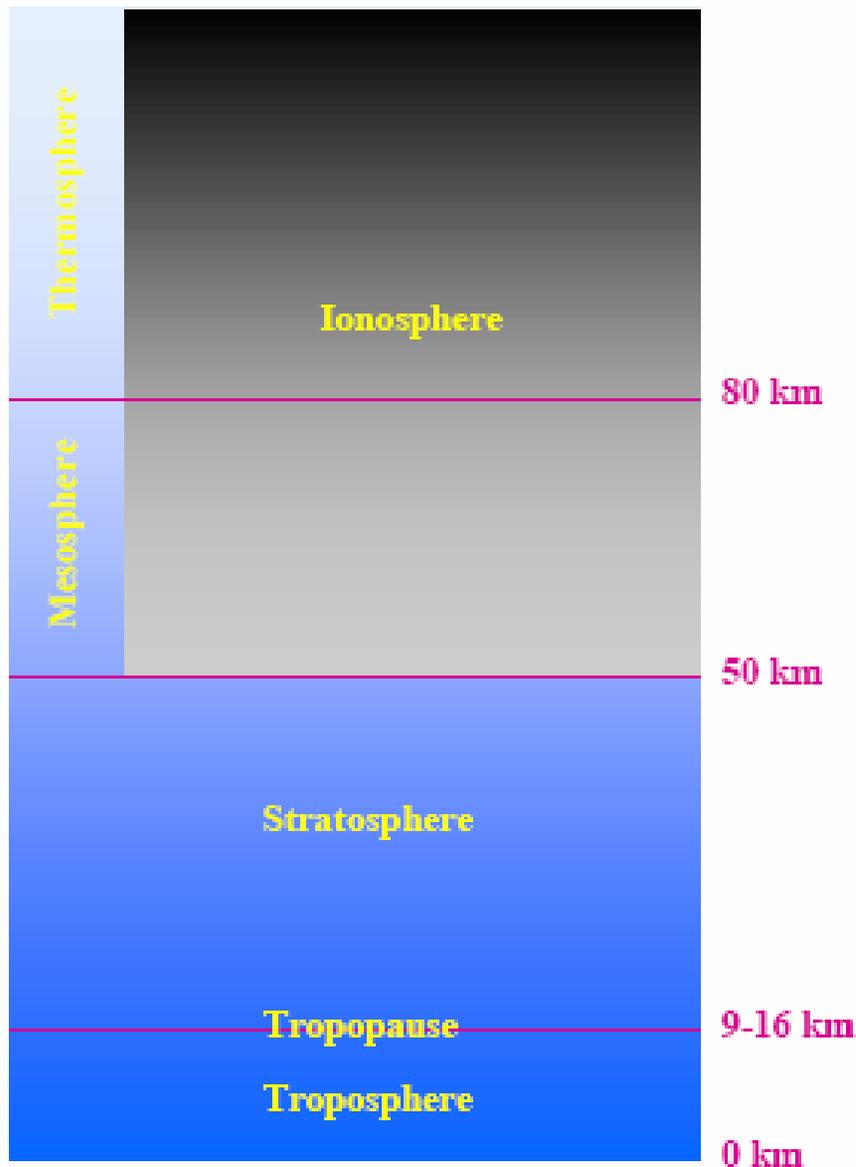
- (180000 iones/cm³)
- Varias radiaciones actuando sobre la transición del O₂ a O, capa de estructura compleja y variable.
- La densidad iónica es mayor de día que de noche, en verano que en invierno.
- En ocasiones, la ionización es particularmente intensa y permanece durante la noche. Capa Es (esporádica)

La atmósfera

Capas atmosféricas : Ionosfera

- Capa F (200 Km - variable)
 - Se desdobla en dos capas F1 y F2
 - F1 aparece durante el día
 - F2 durante el día alcanza 300 -400 Kms y durante la noche se reduce el espesor hasta alcanzar el nivel de la capa F1
 - F1 presenta un comportamiento similar a la capa E.
 - F2 aumento estacional de la densidad (mayor en invierno que en verano)
 - F2 anomalía ecuatorial ($den_{medianoche} > den_{mediodía}$)
 - F2 en el ecuador aparece un mínimo de densidad cuando la radiación solar es mayor

Refracción atmosférica



Retardos atmosféricos

$\Delta\tau$ Diferencia refractada – vacío. Tiempo

$d\Phi$ Diferencia refractada – vacío.
Distancia medio no dispersivo

dP Diferencia refractada – vacío
Medio dispersivo

$$\Delta\tau = \int_s \frac{1}{v} dS - \int_{s'} \frac{1}{c} dS'$$

$$d\Phi = c \Delta\tau$$

$$= \int_s n dS - \int_{s'} dS'$$

$$= \int_s (n - 1) dS + \left[\int_s dS - \int_{s'} dS' \right]$$

$$dP = \int_s (n_g - 1) dS + \left[\int_s dS - \int_{s'} dS' \right]$$

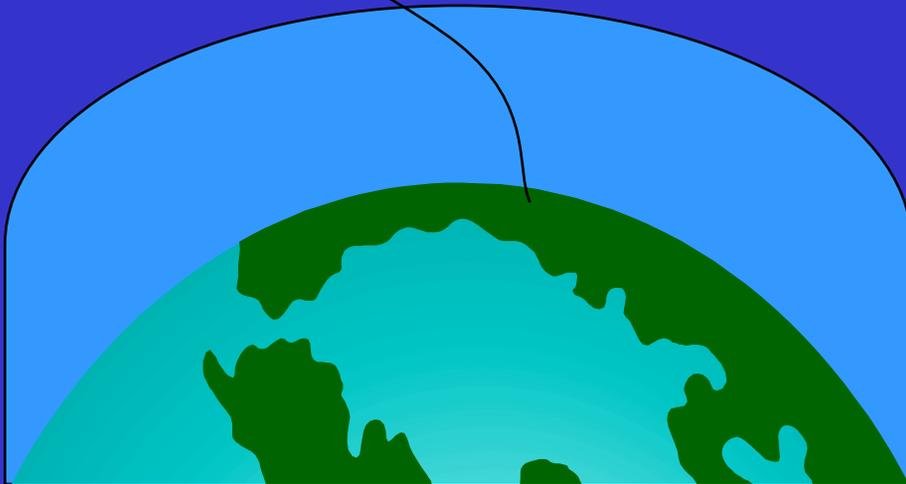
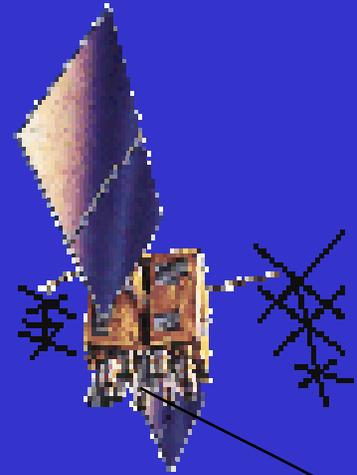
n

Índice de refracción
de fase. Medio no
dispersivo

n_g

Índice de refracción de
grupo. Medio dispersivo

Refracción atmosférica: Ionosfera



- TEC 10^6 electrones/m²
- Medio dispersivo
- Error como función:
 - Frecuencia
 - Actividad solar
 - 11 años de ciclo
 - Movimiento diurno

Refracción ionosférica

$$n \cong 1 - \frac{1}{2}X \pm \frac{1}{2}XY|\cos\theta| - \frac{1}{8}X^2 - \frac{1}{4}XY^2(1 + \cos^2\theta)$$

$$X = \frac{Ne^2}{4\pi^2\epsilon_0 m f^2}$$

$$Y = \frac{B_0|e|}{2\pi m f}$$

GPS L1

Suponiendo

$$N=10^{12}, B_0=0.5 \times 10^{-4}, \theta=0,$$

$$n \cong 1 - 1.6 \times 10^{-5} \pm 1.6 \times 10^{-8} - 1.3 \times 10^{-10} - 1.6 \times 10^{-11}$$

$$I = \frac{\alpha}{f^2} \int_s N \, dS \cong 40.28 \frac{TEC}{f^2}$$

También se obtiene una buena aproximación con:

$$n = 1 - \alpha N / f^2$$

Indice refracción
de fase

$$n_g = 1 + \alpha N / f^2$$

Indice refracción
de grupo

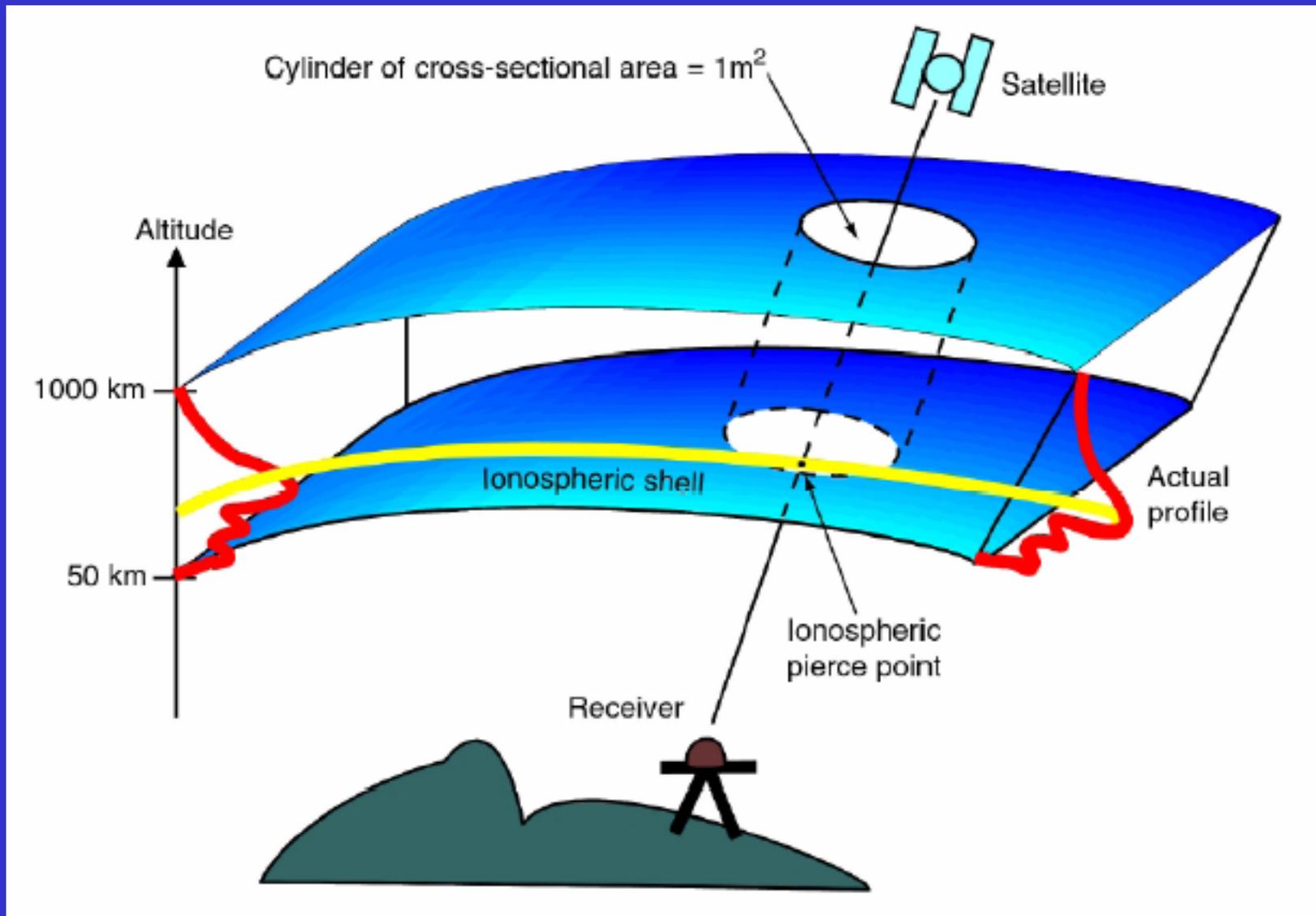
Adelanto

$$\rho_\phi = \int_s (n \, dS) = \int_s \left(1 - \frac{\alpha N}{f^2}\right) dS = \rho - I$$

Retraso

$$\rho_P = \int_s (n \, dS) = \int_s \left(1 + \frac{\alpha N}{f^2}\right) dS = \rho + I$$

Modelo ionosférico I



Modelo ionosférico II

observable

stochastic parameters

receiver bias

$$I_r^s(t) = M(e_r^s) \left[a_{0,r}(t) + a_{1,r}(t) d\lambda_r^s + a_{2,r}(t) d\phi_r^s \right] + b_r + b^s$$

mapping
function

difference in
longitudes of
pierce point
and Sun

difference in
geomagnetic
latitudes of
pierce point
and receiver

satellite
bias

$$M(e) = \left[1 - \frac{r_E^2 \cos^2 e}{(r_E + h)^2} \right]^{-\frac{1}{2}}$$

e - elevation angle
 r_E - mean Earth radius
h - shell height

Retardo Ionosférico (Resumen)

- Causado por la propagación en la Ionosfera, que es un medio dispersivo para el GPS
 - La ionosfera se extiende de los 40 a 1100 km
 - Afecta al código y a la fase de diferente manera
 - Índice de refracción de fase $n_{ph} = 1 + c_2/f^2 \dots$
 - Índice de refracción de grupo $n_{gr} = 1 - c_2/f^2$
 - Es función de la frecuencia de la portadora
 - Las frecuencias más altas son las menos afectadas

Retardo Ionosférico (Resumen)

- La longitud de la trayectoria $s = \int n \, ds$
 - n índice de refracción
 - ds elemento de arco de la trayectoria
- La diferencia de recorrido
 - $\Delta_{\text{ph}}^{\text{iono}} = -(40.3/f^2) \int N_e \, ds_0 = -40.3/f^2 \text{ TEC}$
 - $\Delta_{\text{gr}}^{\text{iono}} = (40.3/f^2) \int N_e \, ds_0 = 40.3/f^2 \text{ TEC}$
 - $\text{TEC} = \int N_e \, ds_0$ contenido total de electrones

Retardo Ionosférico (Resumen)

- Es necesario conocer TEC
- Puede
 - Medirse usando observaciones
 - Estimarse usando modelos
- Cuando se utilizan dos frecuencias puede eliminarse la influencia de la ionosfera.

Modelo de Klobuchar

Efemérides navegación

Señal L1

$$T_{iono} = F * \left[5.0 * 10^{-9} + (AMP) \left(1 - \frac{x^2}{2} + \frac{x^4}{24} \right) \right] \quad \text{si} \quad |x| < 1.57$$

$$T_{iono} = F * 5.0 * 10^{-9} \quad \text{si} \quad |x| \geq 1.57$$

Señal L2

Multiplicar por $\gamma = \left(\frac{f_1}{f_2} \right)^2 = \left(\frac{77}{60} \right)^2$ el resultado anterior

$$F = 1.0 + 16 * (0.53 - E)^3 \quad \text{Factor de oblicuidad}$$

E (semicírculos) Altura del satélite sobre el horizonte

$$AMP = \sum_0^3 \alpha_n \phi_m^n \quad \text{si} \quad AMP \geq 0$$

$$AMP = 0 \quad \text{si} \quad AMP < 0$$

α_n Coeficientes de la amplitud del retardo vertical (Mensaje de navegación)

Modelo de Klobuchar II

$\phi_m = \phi_i + 0.064 * \cos(\lambda_i - 1.617)$ (*semicirculos*) Latitud geomagnética de la proyección de la intersección con la ionosfera I_0 . Se supone una altitud media de la ionosfera de 350 km.

λ_i (*semicirculos*) Longitud geodésica de I_0

$$\lambda_i = \lambda_u + \frac{\psi \text{sen } A}{\cos \phi_i}$$

ϕ_i (*semicirculos*) Latitud geodésica de I_0

$$\phi_i = \phi_u + \psi \cos A \quad \text{Si } |\phi_i| \leq 0.416$$

$$\phi_i = 0.416 \quad \text{Si } \phi_i > 0.416$$

$$\phi_i = -0.416 \quad \text{Si } \phi_i < -0.416$$

ϕ_u (*semicirculos*) Latitud geodésica WGS84 del receptor

λ_u (*semicirculos*) Longitud geodésica WGS84 del receptor

A (*semicirculos*) Acimut del satélite

$$\psi = \frac{0.137}{E+0.11} - 0.022 \quad (\text{semicirculos}) \text{ Ángulo en el centro (Receptor, } I_0)$$

$$x = \frac{2\pi(t-50400)}{PER} \quad (\text{radianes}) \text{ Fase}$$

$$t = 4.32 * 10^4 * \lambda_i + \text{tiempoGPS} \quad (\text{segundos})$$

$$0 \leq t \leq 86400$$

$$\text{Si } t \geq 86400 \quad \text{restar} \quad 86400$$

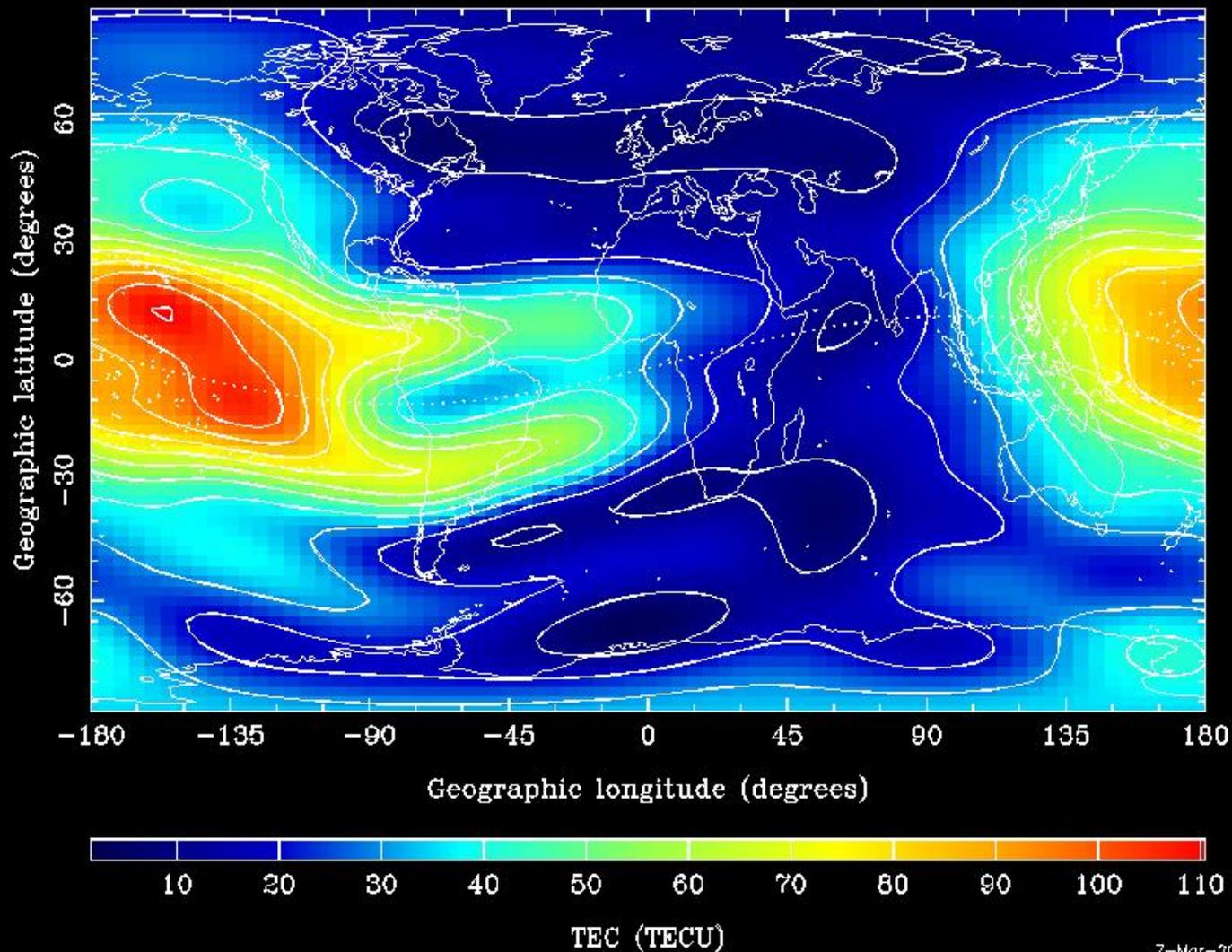
$$\text{Si } t < 0 \quad \text{sumar} \quad 86400$$

$$PER = \sum_0^3 \beta_n \phi_m^n \quad \text{si } PER \geq 72000$$

$$PER = 72000 \quad \text{si } PER < 72000$$

β_n Coeficientes del período (Mensaje de navegación)

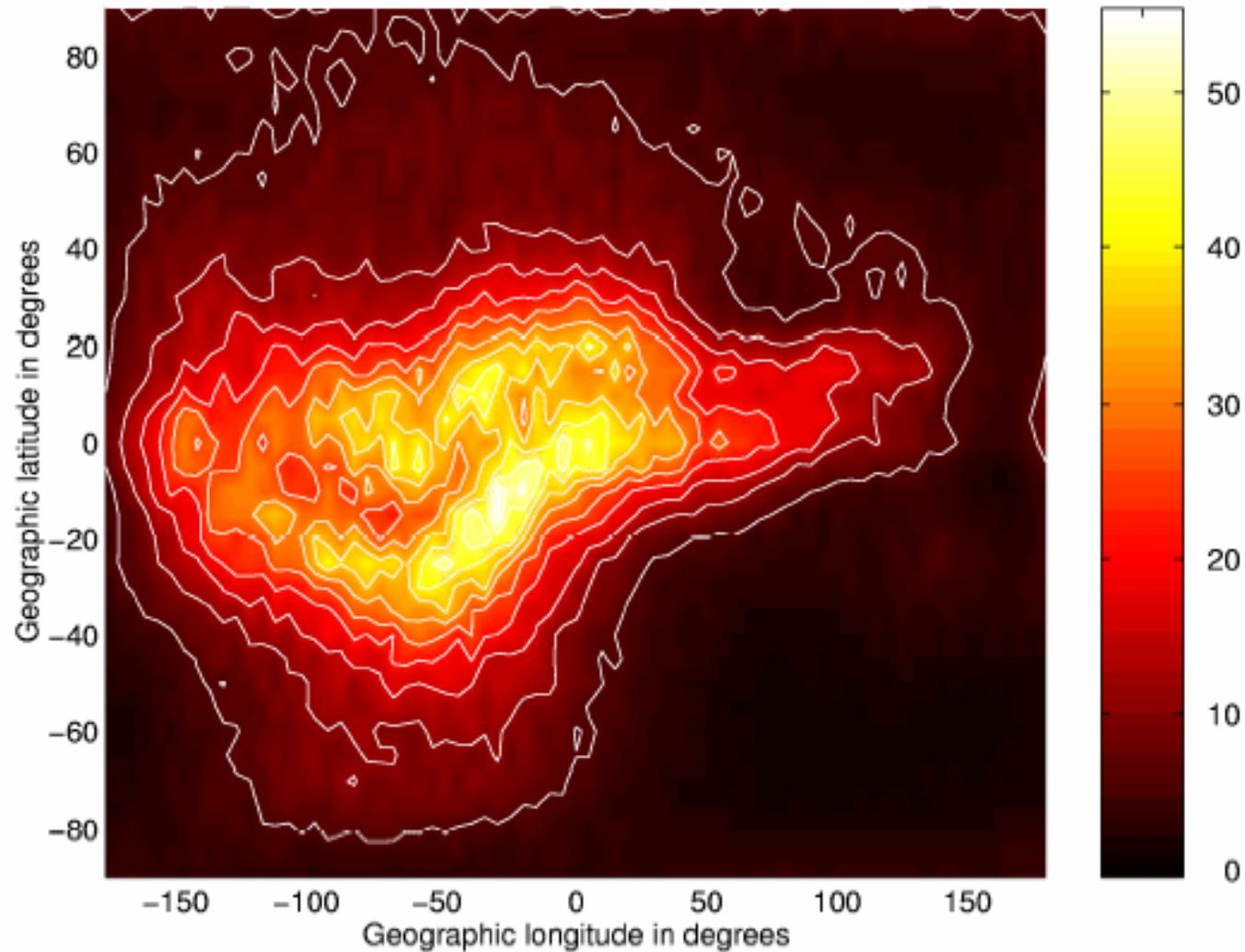
CODE'S GLOBAL IONOSPHERE INFO FOR DAY 062, 2001 - 01:00 UT



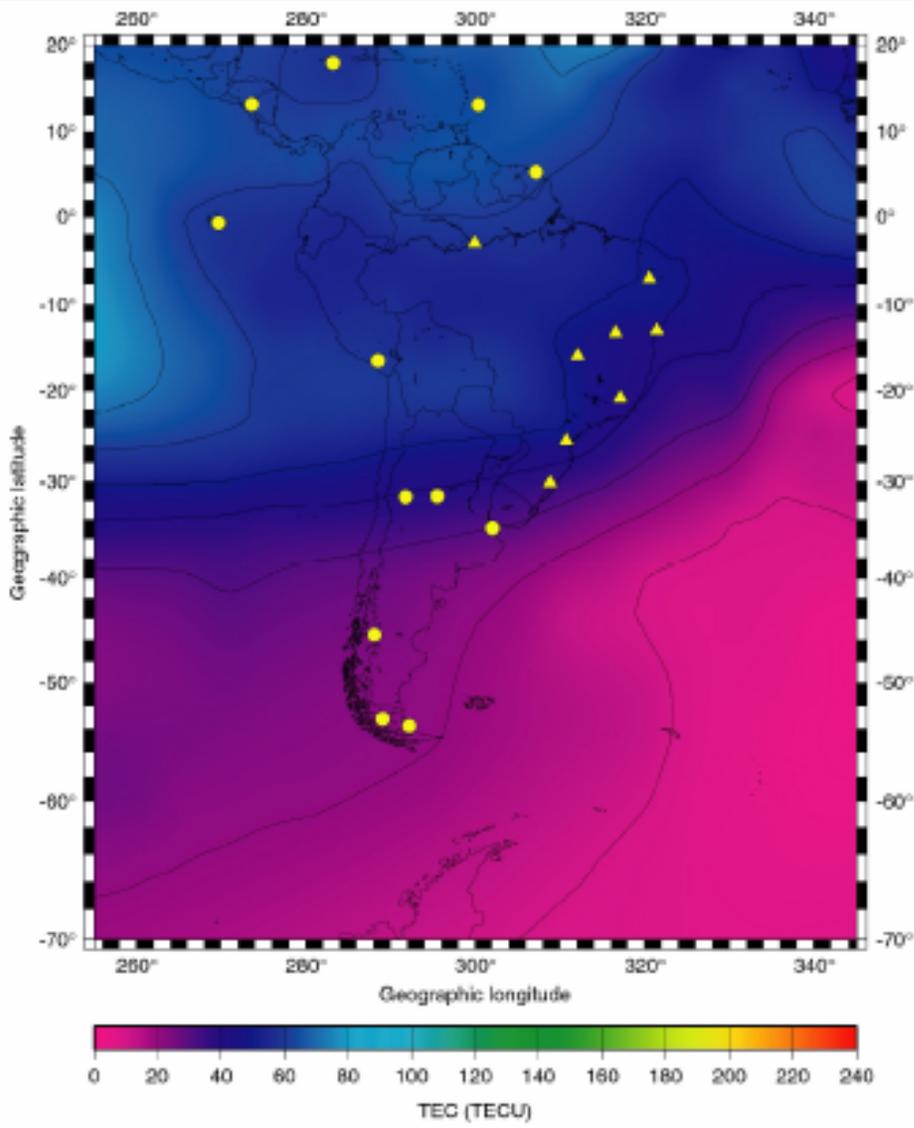
El CODE (Center for Orbit Determination of Europe) determina cada 2 h el estado de la ionosfera.

Global TEC Map from IGS Data

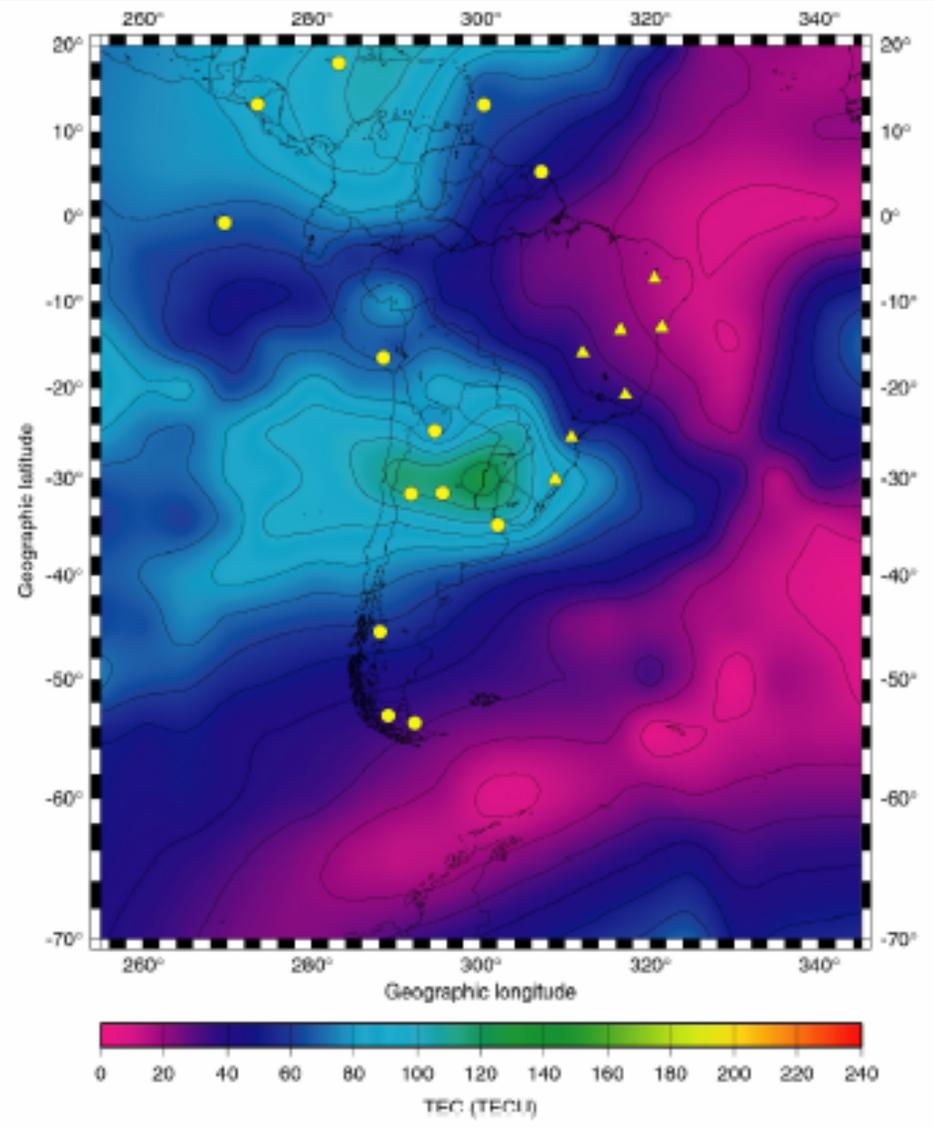
Global TEC Map in TECU for UT=17:00 of 7 April 1995 Using 74 IGS Stations



TEC Maps - St. Swithin's Day Storm



Mean TEC 22:00 UT, 14 July 2000



Mean TEC 22:00 UT, 15 July 2000

Refracción atmosférica:

Troposfera (Medio no dispersivo para la señal GPS)

- $\Delta^{\text{Trop}} = 10^{-6} \int N_d^{\text{Trop}} ds + 10^{-6} \int N_w^{\text{Trop}} ds$
- Dos componentes:
 - Húmeda: $10^{-6} \int N_w^{\text{Trop}} ds$
(función de temperatura y humedad)
 - Seca: $10^{-6} \int N_d^{\text{Trop}} ds$
(función de presión y temperatura)
 - Afecta del mismo modo a la fase y a las pseodistancias

Retardo troposférico

- La componente seca contribuye con 90% del error
 - Fácil de modelar
- La componente húmeda con el 10% restante
 - Es difícil de modelar. Hay que conocer la cantidad de vapor de agua a lo largo de toda la trayectoria

Retardo troposférico

- Hay muchos modelos para estimar la componente seca:
 - Modelo de Hopfield
 - Modelo de Hopfield modificado
 - Modelo de Saastamoinen
 - Modelo de Lanyi
 - Modelo NMF (Niell)
 - Muchos modelos más....

GPS: Corrección troposférica

La atmósfera neutra no es un medio dispersivo para las señales del GPS. De acuerdo con el principio de Fermat, si s es la distancia recorrida a lo largo de la trayectoria

$$s = \int n ds \quad s_0 = \int nds \quad \Delta_{\text{Trop}} = \int (n - 1) ds = 10^{-6} \int N_{\text{Trop}} ds$$

Hopfield (1969) $\Delta_{\text{Trop}} = \Delta_{\text{Trop,d}} + \Delta_{\text{Trop,w}}$

Essen y Frome $N_{\text{trop,d}0} = 77.64p/T$ (p mbar, T °K)

$$N_{\text{trop,w}0} = -12.96e/T + 3.718 \cdot 10^5 e/T^2 \quad (\text{pp vapor mbar})$$

Variación de $N_{\text{trop,d}}$ con la altitud:

$$N_{\text{trop,d}}(h) = N_{\text{trop,d}0} \left(\frac{h_d - h}{h_d} \right)^4 \quad h_d = 40136 + 148.72(T - 273.16)$$

$$\Delta_{\text{Trop,d}} = 10^{-6} N_{\text{trop,d}0} \int \left(\frac{h_d - h}{h_d} \right)^4 ds$$

Variación de $N_{\text{trop,w}}$ con la altitud:

$$N_{\text{trop,w}}(h) = N_{\text{trop,w}0} \left(\frac{h_w - h}{h_w} \right)^4 \quad h_w = 11000 \text{ m}$$

$$\Delta_{\text{Trop,w}} = 10^{-6} N_{\text{trop,w}0} \int \left(\frac{h_w - h}{h_w} \right)^4 ds$$

GPS: Corrección troposférica

Aproximaciones al modelo de Hopfield:

$h_d = 40000\text{m}$, Curvatura cero, dirección del cenit

$$\Delta_{\text{Trop,d}} = 10^{-6} N_{\text{trop,d0}} / h_d^4 \int (h_d - h)^4 dh \quad \text{Integración (0- } h_d)$$

$$\Delta_{\text{Trop,w}} = 10^{-6} N_{\text{trop,w0}} / h_w^4 \int (h_w - h)^4 dh \quad \text{Integración (0- } h_w)$$

Componente vertical $\Delta_{\text{Trop}} = 10^{-6} (N_{\text{trop,d0}} h_d + N_{\text{trop,w0}} h_w) / 5$

En la dirección z , (distancia cenital) $\Delta_{\text{Trop}} / \cos(z) \quad z < 80^\circ$

Seeber (1969)

Las componentes seca y húmeda se ponderan con $(\sin(E^2 + 6.25))^{-1/2}$ y $(\sin(E^2 + 2.25))^{-1/2}$ E altura sobre el horizonte en grados.

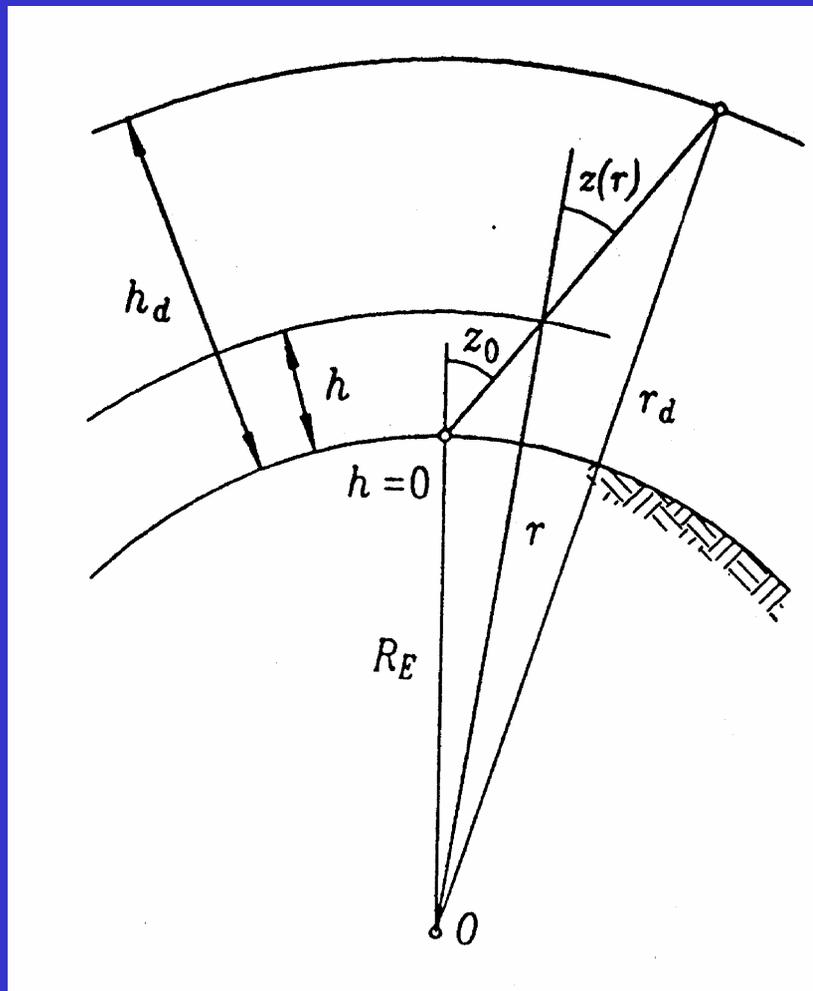
$$\Delta_{\text{Trop,d}}(E) = 10^{-6} N_{\text{trop,d0}} (40136 + 148.72(T - 273.16)) / (5 (\sin(E^2 + 6.25))^{1/2})$$

$$\Delta_{\text{Trop,w}}(E) = 10^{-6} N_{\text{trop,w0}} 11000 / (5 (\sin(E^2 + 2.25))^{1/2})$$

$E > 10^\circ$

GPS: Corrección troposférica

Modelo de Hopfield modificado



Se introducen los vectores de posición.

$$N_{\text{trop,d}}(r) = N_{\text{trop,d0}} \left(\frac{r_d - r}{r_d - R_E} \right)^4$$

$$\Delta_{\text{Trop,d}}(z) = 10^{-6} \int N_{\text{trop,d}}(r) \frac{dr}{\cos z(r)}$$

Intervalo integración (R_E , r_d)

z_0 es la distancia cenital en receptor

$$\sin z(r) = R_E \sin z_0 / r$$

$$\cos z(r) = \left(r^2 - (R_E \sin z_0)^2 \right)^{1/2} / r$$

$$\Delta_{\text{Trop,d}}(z) = A \int r (r_d - r)^4 \left(r^2 - (R_E \sin z_0)^2 \right)^{-1/2} dr$$

$$A = 10^{-6} N_{\text{trop,d0}} / (r_d - R_E)^4$$

$$\Delta_{\text{Trop,w}}(z) = B \int r (r_w - r)^4 \left(r^2 - (R_E \sin z_0)^2 \right)^{-1/2} dr$$

$$B = 10^{-6} N_{\text{trop,w0}} / (r_w - R_E)^4$$

GPS: Corrección troposférica

Reimondi. $r_i = ((R_E + h_i)^2 - R_E \cos E)^{1/2} - R_E \sin E$

$$\Delta_{\text{Trop},i}(\text{metros}) = 10^{-12} N_{\text{Trop},i} [\sum_{k=1}^9 (\alpha_{k,i}/k) r_i^k]$$

$$\alpha_{1,i} = 1 \quad \alpha_{2,i} = 4a_i \quad \alpha_{3,i} = 6a_i^2 + 4b_i \quad \alpha_{4,i} = 4a_i(a_i^2 + 3b_i)$$

$$\alpha_{5,i} = a_i^4 + 12 a_i^2 b_i^2 + 6 b_i^2 \quad \alpha_{6,i} = 4a_i b_i (a_i^2 + 3b_i) \quad \alpha_{7,i} = b_i^2 (6a_i^2 + 4b_i)$$

$$\alpha_{8,i} = 4a_i b_i^3 \quad \alpha_{9,i} = b_i^4 \quad a_i = -\sin E / h_i \quad b_i = -\cos^2 E / (2h_i R_E)$$

$$h_d = 40136 + 148.72(T - 273.16) \quad h_i = 11000\text{m}$$

i representa d o w (Componentes seca y húmeda de la corrección)

La componente seca representa el 90% de la corrección.

En ocasiones, sólo se calcula la componente seca, dejando la húmeda que se compense al ajustar las observaciones

Retardo troposférico en el zenit. T_z

$$T_z = \int [n(r) - 1] dr = 10^{-6} \int N(r) dr$$

$$N = K_1 \frac{P}{T} + K_2 \frac{e}{T} + K_3 \frac{e}{T^2}$$

seca

húmeda

Sin compresión hidrostática

$$N = K_1 \frac{M}{M_d} \frac{P}{T} + \left(K_2 - K_1 \frac{M}{M_d} \right) \frac{e}{T} + K_3 \frac{e}{T^2}$$

hidrostática

húmeda

Compresión hidrostática

Retardo troposférico T en el hemisferio visible

$$T = T_h^z m_h(e) + T_w^z m_w(e)$$

$m_h(e)$

$m_w(e)$

mapping functions

Signal Blockage



Tall buildings can block
GPS satellite signals

Reduced satellite visibility
increases geometrical
dilution of precision
resulting in reduced
positioning accuracy



Pérdidas de ciclo

Las pérdidas de ciclos suponen un salto en el registro de las medidas de fase por

- interrupción o pérdida de la señal enviada por el satélite (árboles, edificios, montañas...).
- baja calidad de la señal, SNR (calidad señal-ruido) debido a una baja elevación del satélite, malas condiciones ionosféricas, multipath, etc.
- fallo en el software del receptor, que lleva a un procesamiento incorrecto de la señal.
- mal funcionamiento del oscilador del satélite (menos probable).

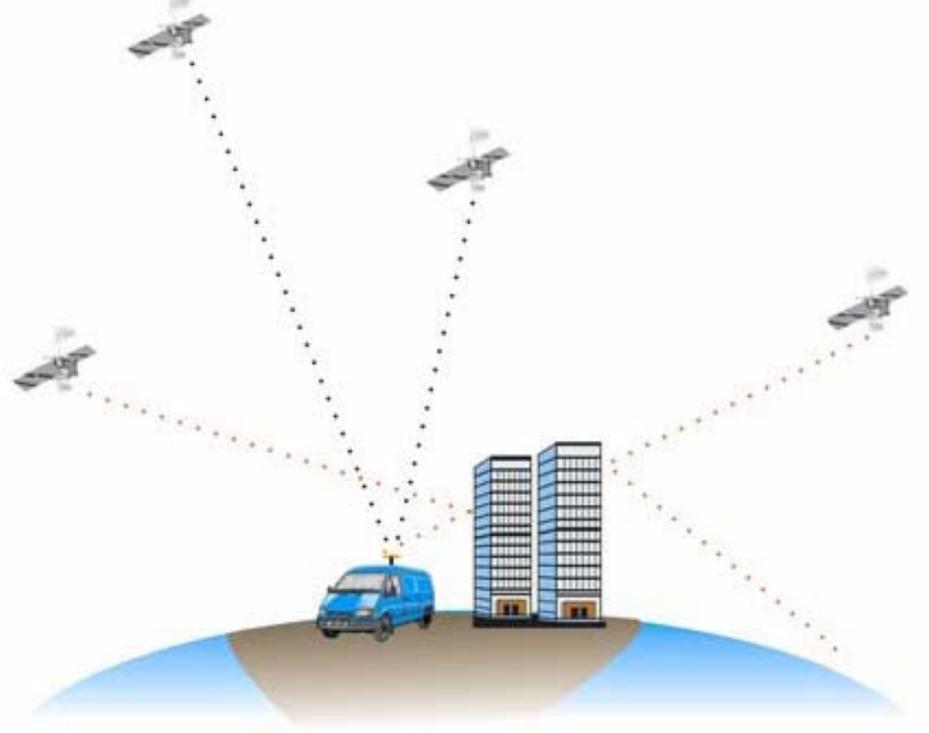
El problema es sencillo y también su solución, siempre que el salto de ciclo o pérdida no sea muy grande.

La detección es sencilla por medio de un chequeo. Una vez determinado el tamaño de la pérdida de ciclo, la reparación se hace corrigiendo a todas las observaciones de fase siguientes para este satélite, según una cantidad fija.

También el software interno del receptor es capaz de detectar y corregir estas pérdidas.

GPS Entorno urbano

Multitrayectoria



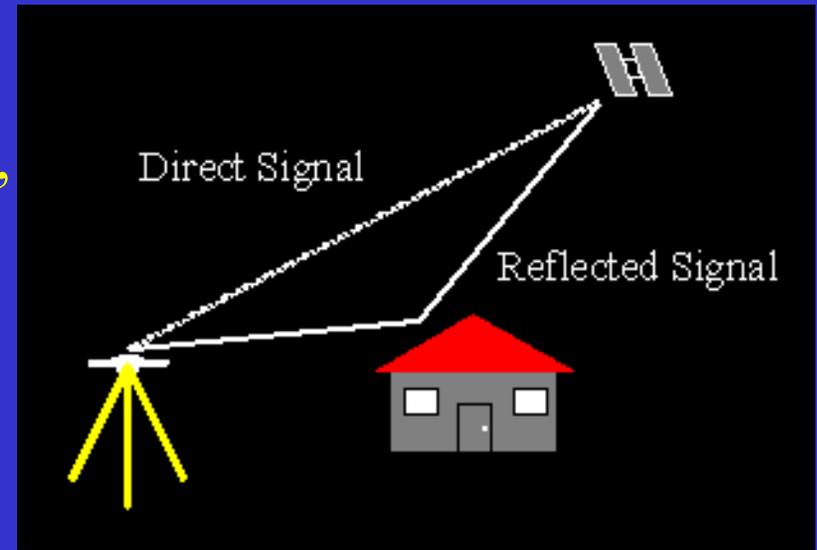
- En fase: 0.5 cm
- En código: metros
- Solución:
 - Software
 - Antenas Choke ring



Multipath o Multitrayectoria

Este efecto es causado por múltiples reflexiones de la señal emitida por el satélite en superficies cercanas a la antena. La consecuencia es que las señales recorren un camino más largo y puede distorsionar la amplitud y forma de la onda.

Solución: elegir puntos protegidos de reflexiones de edificios, vehículos, árboles... También el diseño de la antena reduce considerablemente el efecto, mediante planos de tierra o antenas tipo “choke ring”, reduciendo interferencias de señales con baja elevación (una vez más la máscara!).

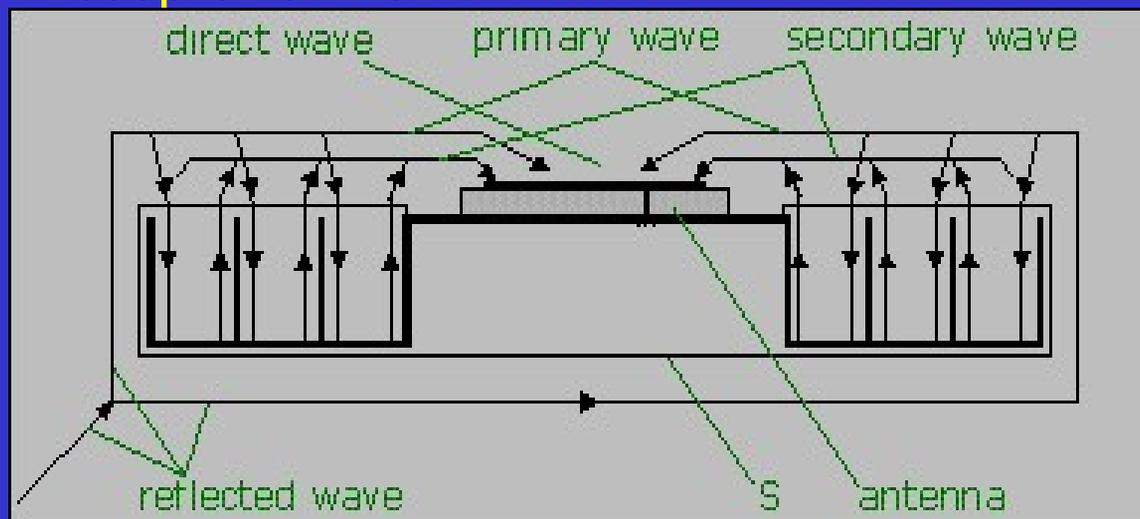


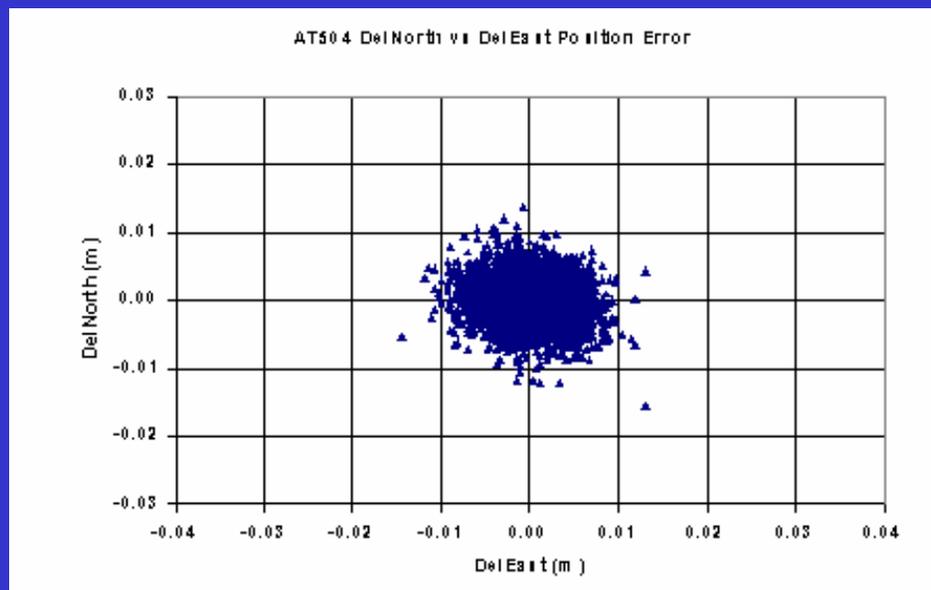
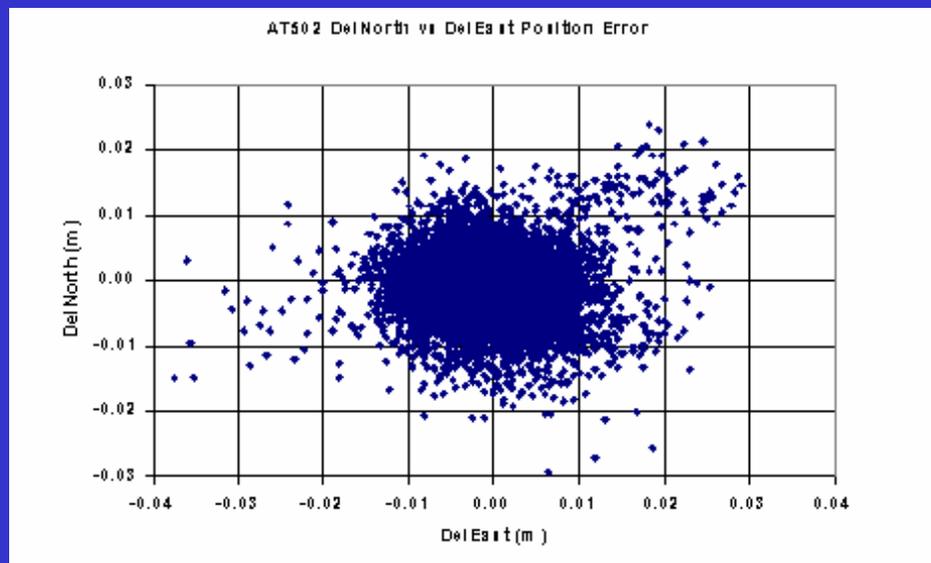
El efecto depende de la frecuencia y por ello las medidas de fase están menos afectadas que las de código, donde puede llegar a 1 m.

Lógicamente ni en DGPS se anula este efecto.

El plano de tierra combinado con anillos circulares están diseñados para rechazar el multipath en las frecuencias de GPS. Este es uno de los aspectos más investigados en los últimos años y en el que muchos fabricantes han avanzado, desarrollando técnicas de detección y corrección.

Incrementando el t de observación también se reduce el efecto, puesto que el ángulo SV-receptor cambia.





Comparación de medidas en antena Leica
con y sin Choke Ring

J.González
Matesanz
Cartagena 2002