

GNSS: MÉTODOS DE POSICIONAMENTO

PTR5923

Prof. Flávio Vaz

flaviovaz@usp.br

Pré-requisitos

- Conceito dos referenciais celeste e terrestre
- Sistemas de projeção cartográfica
- Sistemas de coordenadas cartesianas e geodésicas
- Sistema UTM
- Conceitos básicos de superfícies de referência
 - Geóide
 - Elipsóide

Objetivos

- Apresentar ao aluno os conceitos introdutórios sobre os sistemas de posicionamento por satélites artificiais, os diferentes métodos de posicionamento e trazer à discussão a problemática da precisão e acurácia obtidas pelo sistema bem como as técnicas para otimizá-las.

Conteúdo Programático

- Formas da Terra
- Sistemas de Referência e Coordenadas
- Histórico do Sistema GPS
- Estrutura do Sistema GPS
- Sistema Glonass
- Sistema Galileo
- GPS - Sinais transmitidos
- Tempo GPS
- Posicionamento pelo uso do código
 - Equação dos sinais
 - Cálculo da pseudodistância
- Posicionamento pelo uso da portadora
 - Simples, dupla e tripla diferença de fase
 - Solução da ambiguidade
- Erros do sistema
- DOP - Diluição da posição
- Tipos de Receptores
- Técnicas de posicionamento

Introdução

- Desde as primeiras viagens o ser humano sente a necessidade de se posicionar
- Navegar: Saber onde se **está**, para onde de **vai** e saber **voltar!**
- Necessidade de saber a forma da Terra e um sistema referencial
- As grandes navegações (1500) e o uso dos Astros.

Formas da Terra

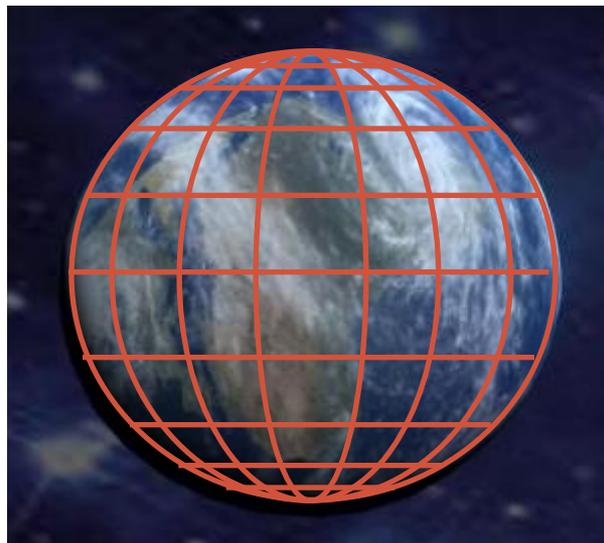
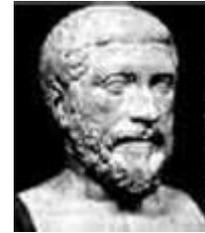
- Plana: Disco sobre 3 elefantes apoiado em uma tartaruga nadando no leite!



Formas da Terra

Esférica:

- Pitágoras de Samos (571-497 a.C) e
- Tales de Mileto (630-545 a.C.)
 - Defendiam a esfericidade da Terra por razões místicas e o fato da mesma girar em torno do Sol (heliocentrismo).



Formas da Terra



Esférica:

- Aristóteles (384-322 a.C.) apresentou três argumentos para a esfericidade da Terra:
 - Variação no aspecto do céu estrelado com a latitude;
 - Tendência das partículas a se dirigirem para um ponto central do Universo;
 - Sombra circular da Terra nos eclipses da Lua.

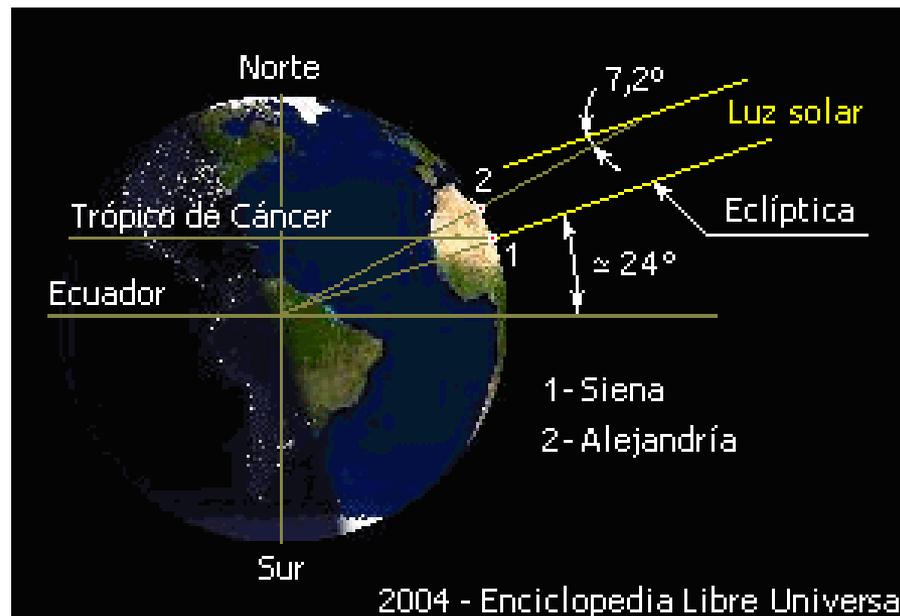


Formas da Terra



Esférica:

- Eratóstenes (276-197 a.C) - Medição do raio da Terra
39.556,96 estádias \cong 6.210 km, com erro inferior a 2%.

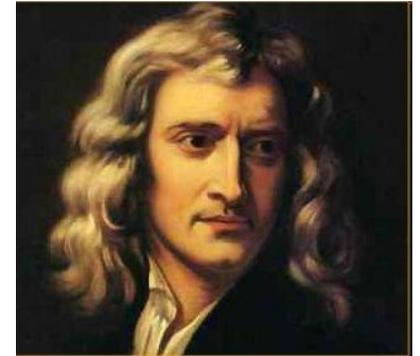


Formas da Terra

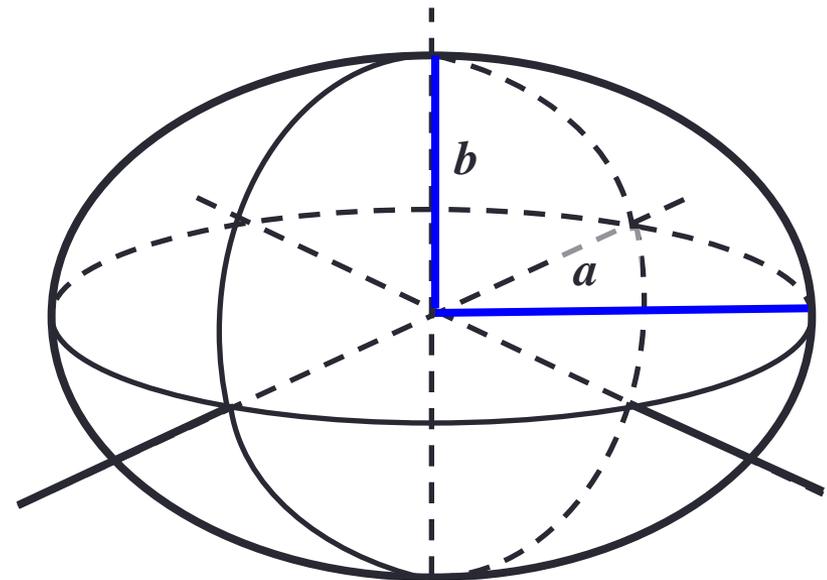
Elipsóide:

– Sir Isaac Newton (1642-1727)

- Elipsóide de revolução: figura geométrica gerada pela rotação de uma elipse em torno do eixo menor



- semi-eixo maior: a
- semi-eixo menor: b
- achatamento: $f = (a-b)/a$
- excentricidade: $e = c/a = \sqrt{1-b^2/a^2}$

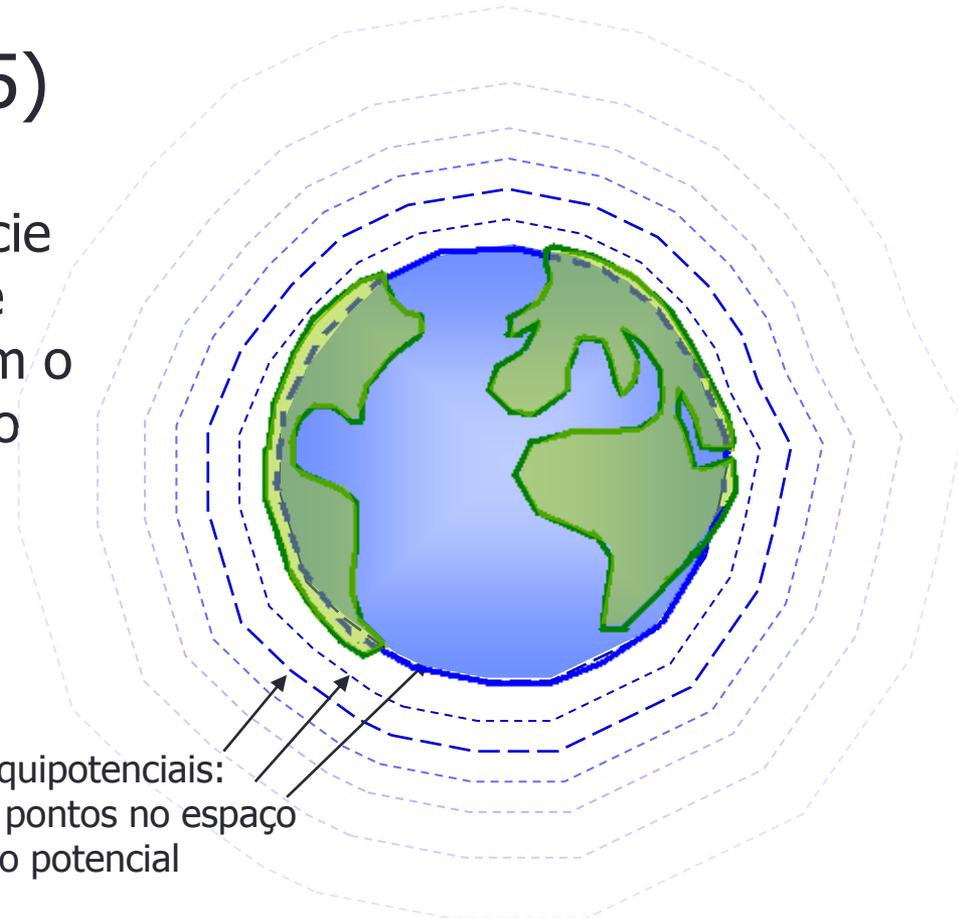


Formas da Terra



Geóide:

- Gauss (1777 - 1855)
 - caracterizou a Superfície Geoidal como uma superfície equipotencial do campo de gravidade que coincide com o nível médio não perturbado dos mares.



Superfícies equipotenciais:
conjunto de pontos no espaço
com o mesmo potencial
gravitacional

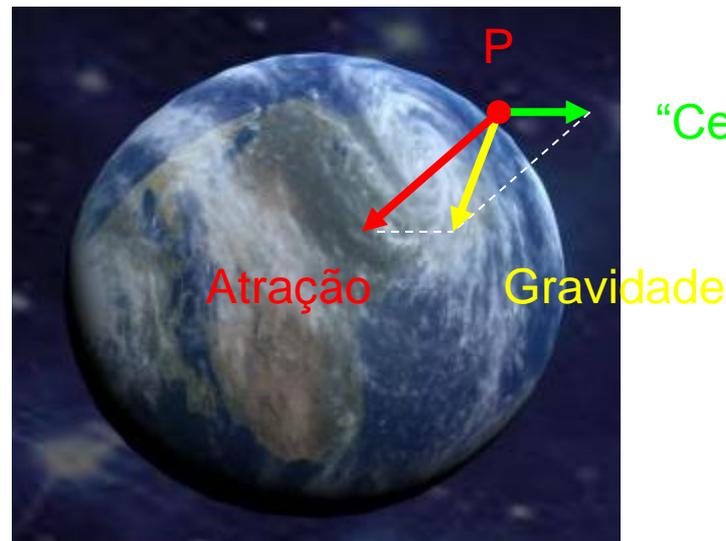
Formas da Terra



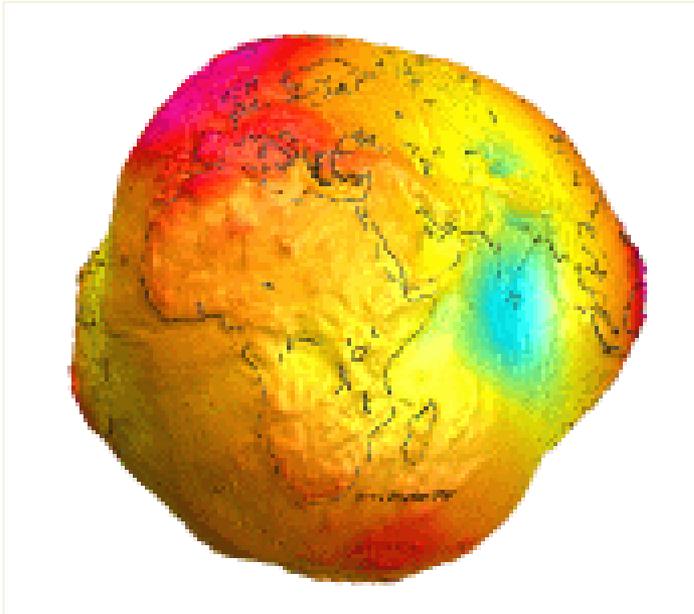
Geóide:

- Os objetos próximos ou sobre à superfície da Terra estão sujeitos a 2 forças:

- **Campo gravitacional** é o conjunto de pontos do espaço sujeito à força gravitacional.
- **Campo de gravidade** é o conjunto de pontos do espaço sujeito à força de gravidade.



Formas da Terra



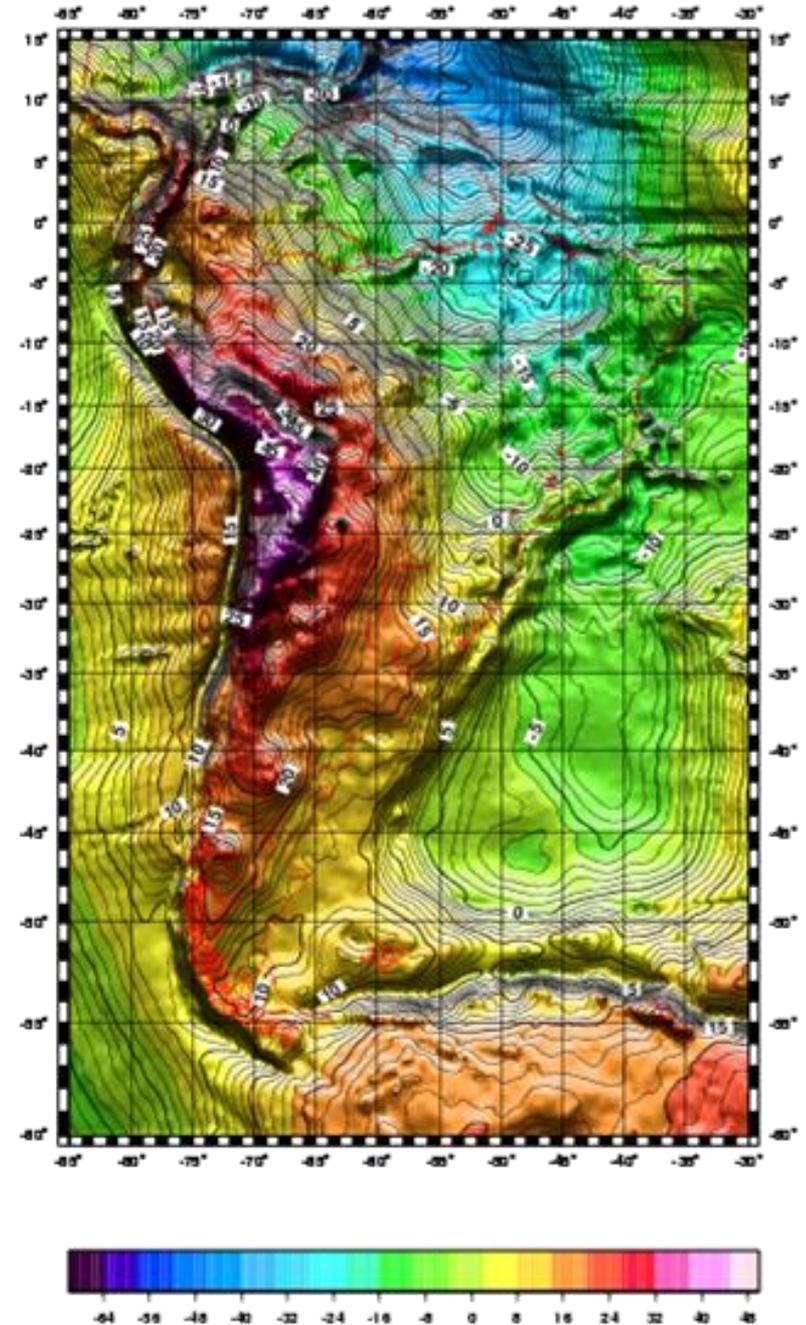
Fonte: http://www.gfz-potsdam.de/pb1/op/grace/index_GRACE.html

Geóide:

- Sua superfície pode ser materializada através dos marégrafos.
- Superfície levemente irregular devido à não homogeneidade de distribuição de massa da Terra.
- Em todos os pontos da superfície geoidal, o potencial de gravidade é constante (W_o).

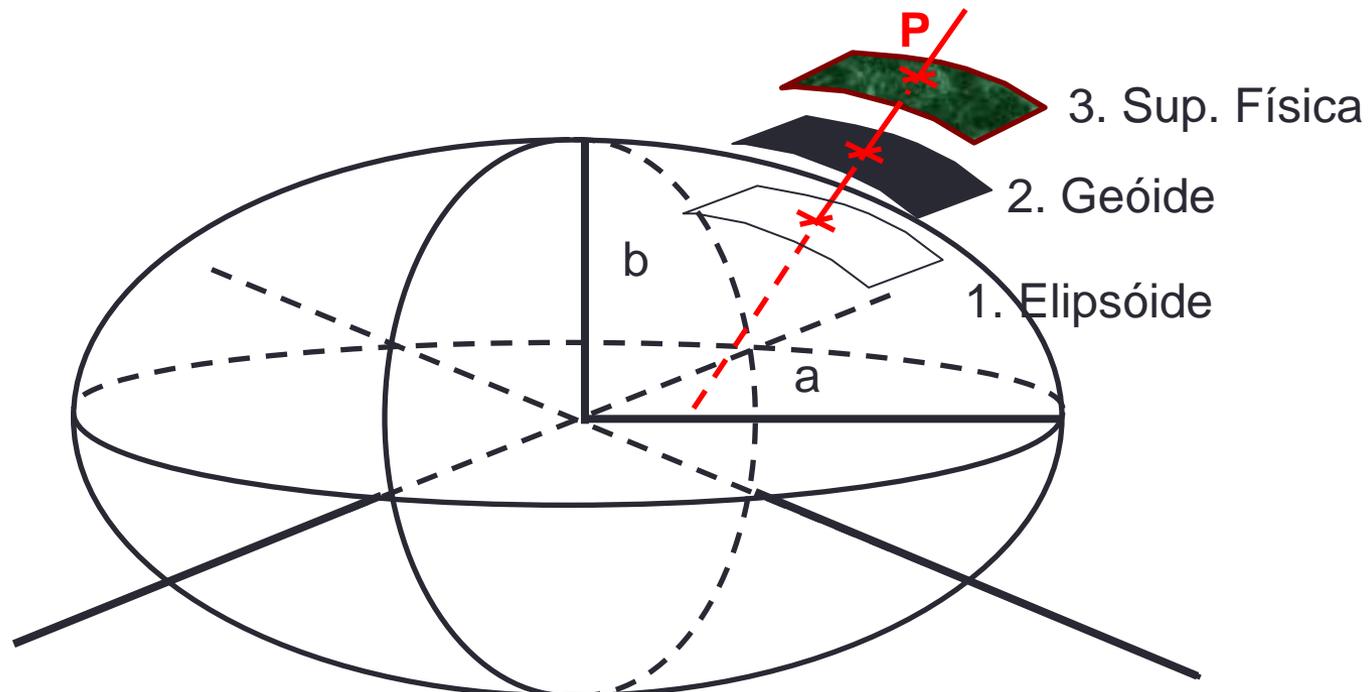
Formas da Terra

Carta geoidal da
América do Sul
(2004):



Superfícies de Referência

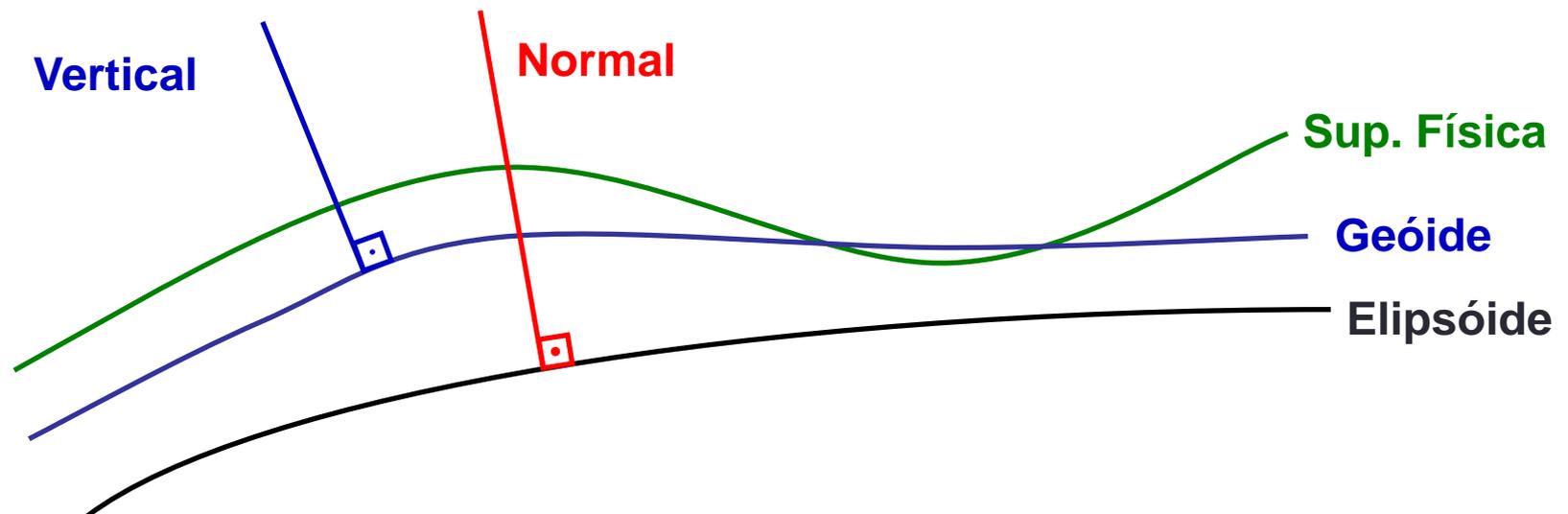
1. Superfície elipsoidal: limitante do elipsóide de referência;
2. Superfície geoidal: limitante do geóide;
3. Superfície física: limitante do relevo topográfico.



Superfícies de Referência

Normal: reta que passa por um ponto do espaço perpendicular à superfície elipsoidal.

Vertical: reta que passa por um ponto do espaço perpendicular à superfície geoidal.

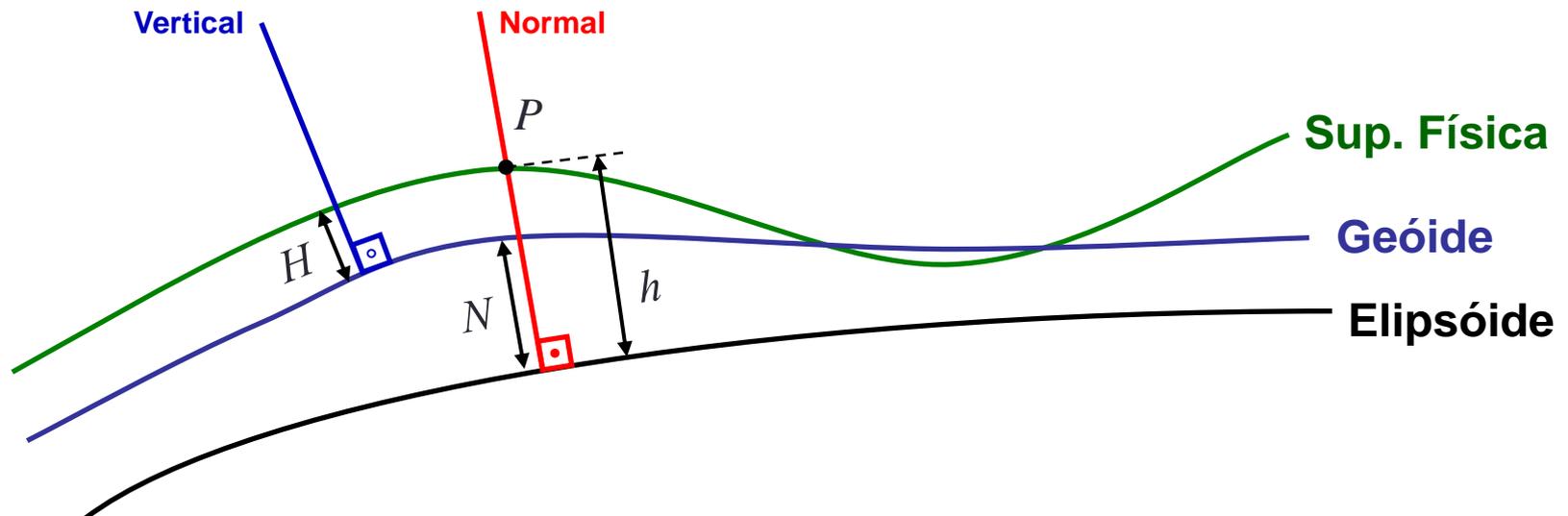


Superfícies de Referência

ALTITUDE ORTOMÉTRICA (H): distância entre a superfície geoidal e a superfície física medida ao longo da vertical;

ALTURA GEOIDAL (N): distância entre a superfície elipsoidal e a geoidal medida ao longo da normal;

ALTITUDE GEODÉSICA OU GEOMÉTRICA (h): distância entre a superfície elipsoidal e o ponto espacial P , medida ao longo da normal.

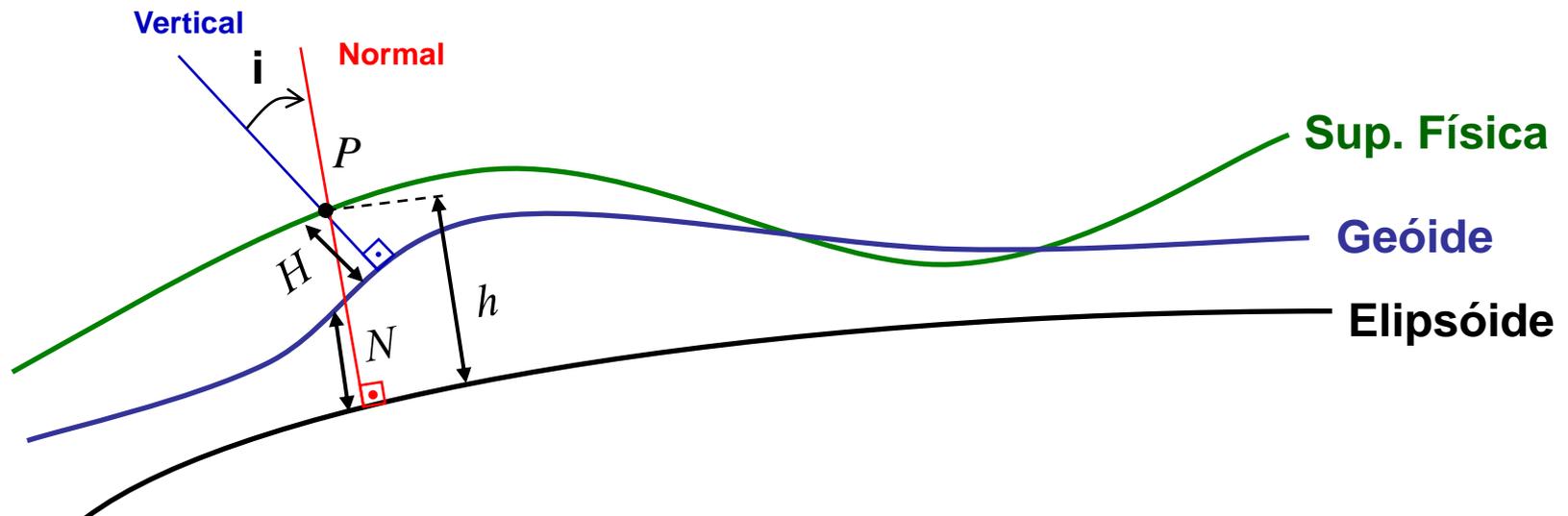


Superfícies de Referência

Relação aritmética: $h \cong H + N$.

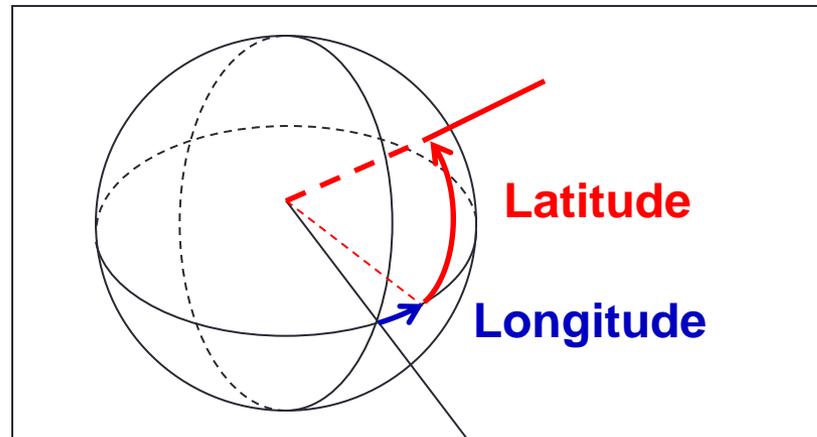
- h = Altitude geométrica (GPS)
- N = Altura Geoidal
- H = Altitude Ortométrica

Desvio da vertical: desvio angular entre a normal e a vertical.



Sistema de Coordenadas

- **Coordenadas Astronômicas**
 - **Latitude:** ângulo que a vertical forma com sua projeção sobre o plano do equador.
 - **Longitude:** ângulo diedro formado pelo plano do meridiano astronômico de Greenwich e pelo plano do meridiano astronômico local.

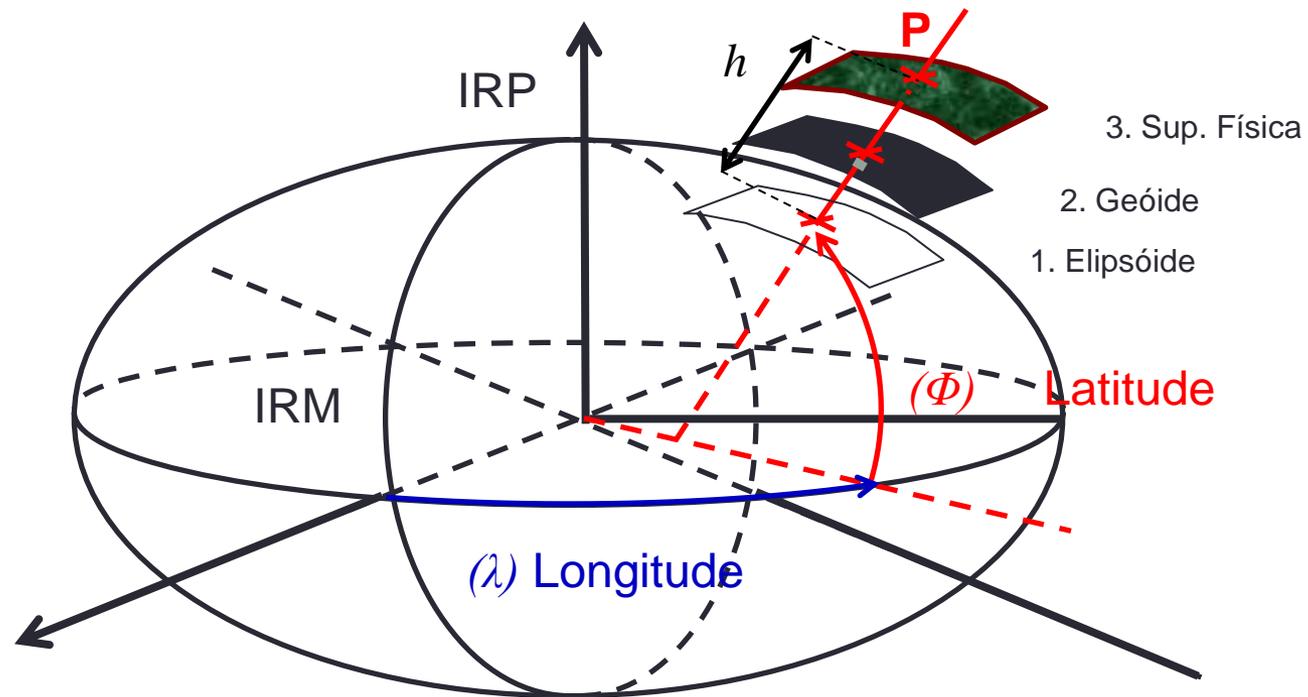


Sistema de Coordenadas

- Coordenadas Geodésica ou Elipsóidica
 - **Latitude**: ângulo que a normal forma com sua projeção sobre o plano do equador (Φ);
 - **Longitude**: ângulo diedro formado pelo plano do meridiano geodésico de referência e pelo plano do meridiano geodésico local (λ);
 - **Altitude** Geodésica ou Geométrica (h).
 - Terno (Φ, λ, h)

Sistema de Coordenadas

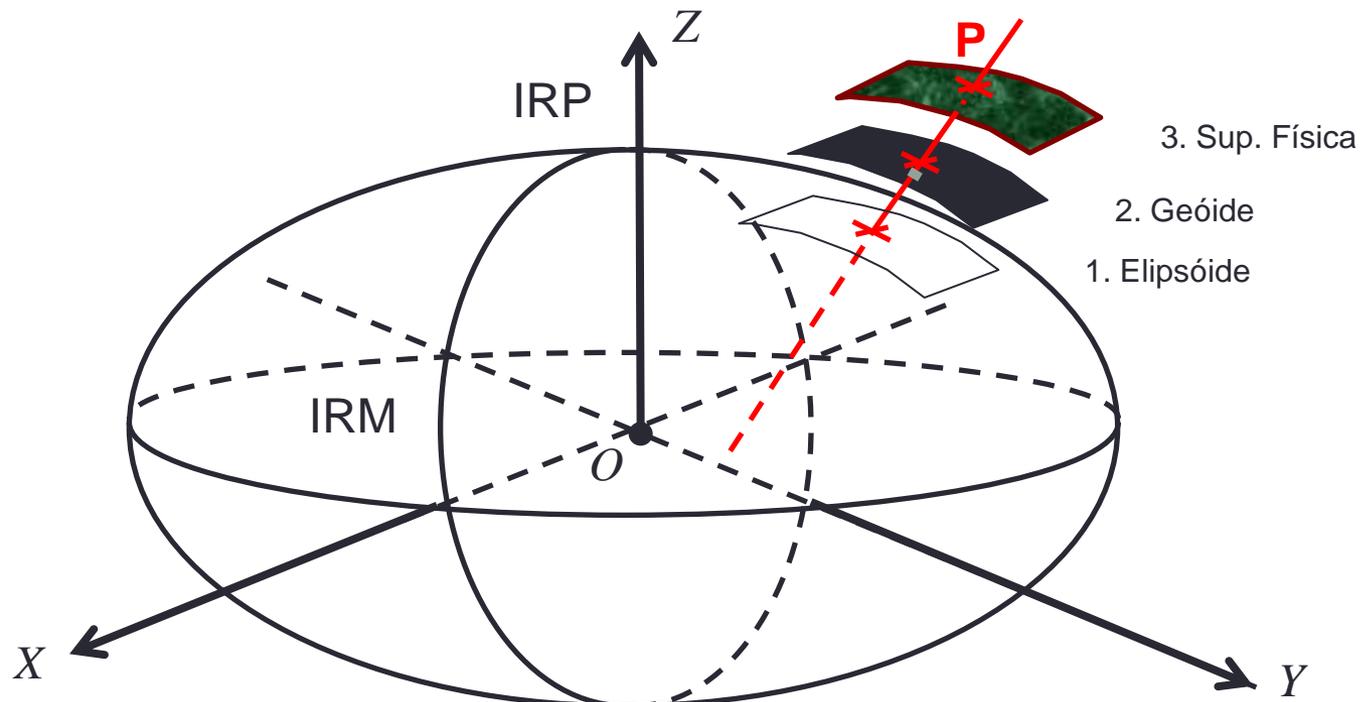
- Coordenadas Geodésica ou Elipsóidica
 - **IRM**: International Reference Meridian (antigo Greenwich)
 - **IRP**: International Reference Pole (Norte)



Sistema de Coordenadas

• Coordenadas Cartesianas

- Origem: centro de massa da Terra
- O eixo X é orientado na direção do IRM
- O eixo Z é orientado na direção do IRP
- O eixo Y a 90° de OX completando um sistema dextrógiro



Transformação de coordenadas

Geodésicas (ϕ, λ, h) para cartesianas (X, Y, Z) :

- $X = (N+h) \cos \phi \cos \lambda$
- $Y = (N+h) \cos \phi \sin \lambda$
- $Z = [(1-e^2) N+h] \sin \phi$

Onde:

- $N = a / (1-e^2 \sin^2 \phi)^{1/2}$ – Grande Normal (1°)
- $e^2 = (a^2 - b^2) / a^2$ - Achatamento

Transformação de coordenadas

Cartesianas (X, Y, Z) para Geodésicas (ϕ, λ, h) :

$$\lambda = \arctan\left(\frac{Y}{X}\right)$$

$$h = \frac{\sqrt{X^2 + Y^2}}{\cos\Phi} - \bar{N}$$

$$\Phi = \arctan\left(\frac{Ze^2 b \sin^3 u}{\sqrt{X^2 + Y^2} - e^2 a \cos^3 u}\right)$$

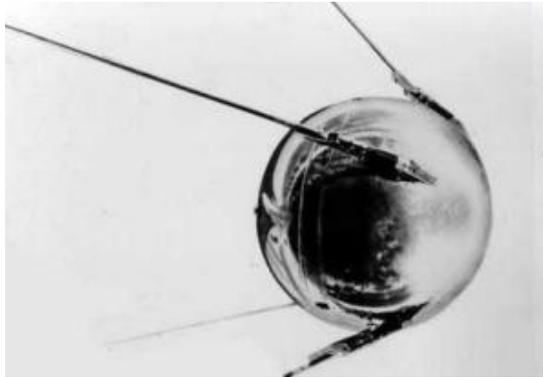
$$\sin u = \frac{\tan u}{\sqrt{1 + \tan^2 u}}$$

$$\cos u = \frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2 u}}$$

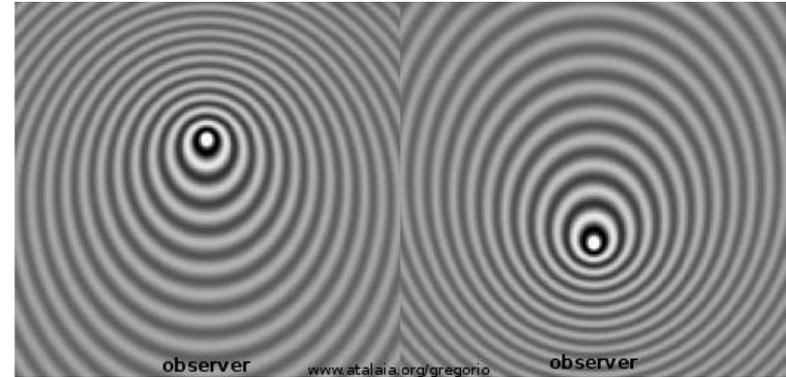
$$\tan u = \frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \frac{a}{b}$$

$$\bar{N} = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \Phi}}$$

Histórico do Sistema GPS



<http://novaonline.nvcc.edu>

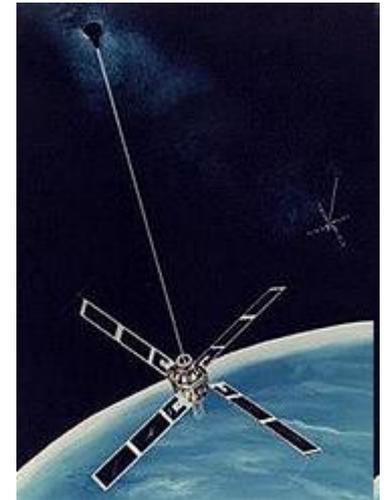


- Início da era espacial: SPUTNIK I (4/10/1957)
- Utilização do efeito Doppler-Fizeau na determinação da órbita dos satélites por Guier e Weiffenbach
- Determinação da posição a partir de órbitas conhecidas por McClure.

Histórico do Sistema GPS

Sistema TRANSIT 1960

- Princípio Doppler
- Precisão 200m
- Sistema disponível aprox. 1h por dia
- Sistema bi-dimensional (latitude e longitude).



<http://www.astronautix.com>

Histórico do Sistema GPS

- **NAVigation System with Timing and Ranging/Global Positioning System.**
 - NAVSTAR / GPS
 - Sistema de posicionamento desenvolvido pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos.
 - Fornecer a posição e o tempo de modo instantâneo e contínuo sobre toda a superfície da Terra.
 - Junção de dois programas:
 - TIMATION - Marinha
 - 621B - Força Aérea.

LAUNCHES

=====

GPS IIF-4 (SVN66/PRN27) was launched on 15 MAY 2013 at 2113 UT from Cape Canaveral, Florida.

CURRENT BLOCK II/IIA/IIR/IIR-M SATELLITES

=====

LAUNCH ORDER	PRN	SVN	LAUNCH DATE	FREQ STD	PLANE	US SPACE COMMAND **								
*II-1		14	14 FEB 1989			19802	IIR-2	13	43	23	JUL 1997	Rb	F3	24876
*II-2		13	10 JUN 1989			20061	IIR-3	11	46	07	OCT 1999	Rb	D5	25933
*II-3		16	18 AUG 1989			20185	IIR-4	20	51	11	MAY 2000	Rb	E1	26360
*II-4		19	21 OCT 1989			20302	IIR-5	28	44	16	JUL 2000	Rb	B3	26407
*II-5		17	11 DEC 1989			20361	IIR-6	14	41	10	NOV 2000	Rb	F1	26605
*II-6		18	24 JAN 1990			20452	IIR-7	18	54	30	JAN 2001	Rb	E4	26690
*II-7		20	26 MAR 1990			20533	IIR-8	16	56	29	JAN 2003	Rb	B1	27663
*II-8		21	02 AUG 1990			20724	IIR-9	21	45	31	MAR 2003	Rb	D3	27704
*II-9		15	01 OCT 1990			20830	IIR-10	22	47	21	DEC 2003	Rb	E2	28129
IIA-10	32	23	26 NOV 1990	Rb	E5	20959	IIR-11	19	59	20	MAR 2004	Rb	C3	28190
*IIA-11		24	04 JUL 1991	Cs		21552	IIR-12	23	60	23	JUN 2004	Rb	F4	28361
*IIA-12		25	23 FEB 1992	Rb		21890	IIR-13	02	61	06	NOV 2004	Rb	D1	28474
*IIA-13		28	10 APR 1992			21930	IIR-14M	17	53	26	SEP 2005	Rb	C4	28874
IIA-14	26	26	07 JUL 1992	Rb	F5	22014	IIR-15M	31	52	25	SEP 2006	Rb	A2	29486
*IIA-15		27	09 SEP 1992	Cs		22108	IIR-16M	12	58	17	NOV 2006	Rb	B4	29601
*IIA-16		32	22 NOV 1992			22231	IIR-17M	15	55	17	OCT 2007	Rb	F2	32260
*IIA-17		29	18 DEC 1992			22275	IIR-18M	29	57	20	DEC 2007	Rb	C1	32384
*IIA-18		22	03 FEB 1993			22446	IIR-19M	07	48	15	MAR 2008	Rb	A4	32711
*IIA-19		31	30 MAR 1993			22581	IIR-20M	30	49	24	MAR 2009	Rb	B6	
*IIA-20		37	13 MAY 1993			22657	IIR-21M	05	50	17	AUG 2009	Rb	E3	
IIA-21	09	39	26 JUN 1993	Cs	A5	22700	IIF-1	25	62	28	MAY 2010	Rb	B2	36585
*IIA-22		35	30 AUG 1993	Rb		22779	IIF-2	01	63	16	JUL 2011	Rb	D2	37753
IIA-23	04	34	26 OCT 1993	Rb	D4	22877	IIF-3	24	65	04	OCT 2012	Cs	A1	38833
IIA-24	06	36	10 MAR 1994	Rb	C6	23027	IIF-4	27	66	15	MAY 2013	Rb	C5	39166
IIA-25	03	33	28 MAR 1996	Cs	C2	23833								
IIA-26	10	40	16 JUL 1996	Cs	E6	23953								
IIA-27		30	12 SEP 1996	Cs		24320								
IIA-28	08	38	06 NOV 1997	Cs	A3	25030								
***IIR-1		42	17 JAN 1997											

* Satellite is no longer in service.

** US SPACE COMMAND, previously known as the NORAD object number; also referred to as the NASA Catalog number. Assigned at successful launch. Catalog numbers retrieved from SPACEWARN Bulletins: <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/spacewarn/>

*** Unsuccessful launch.

Satélite GPS



Satélite GPS



<http://www.nasa.gov>

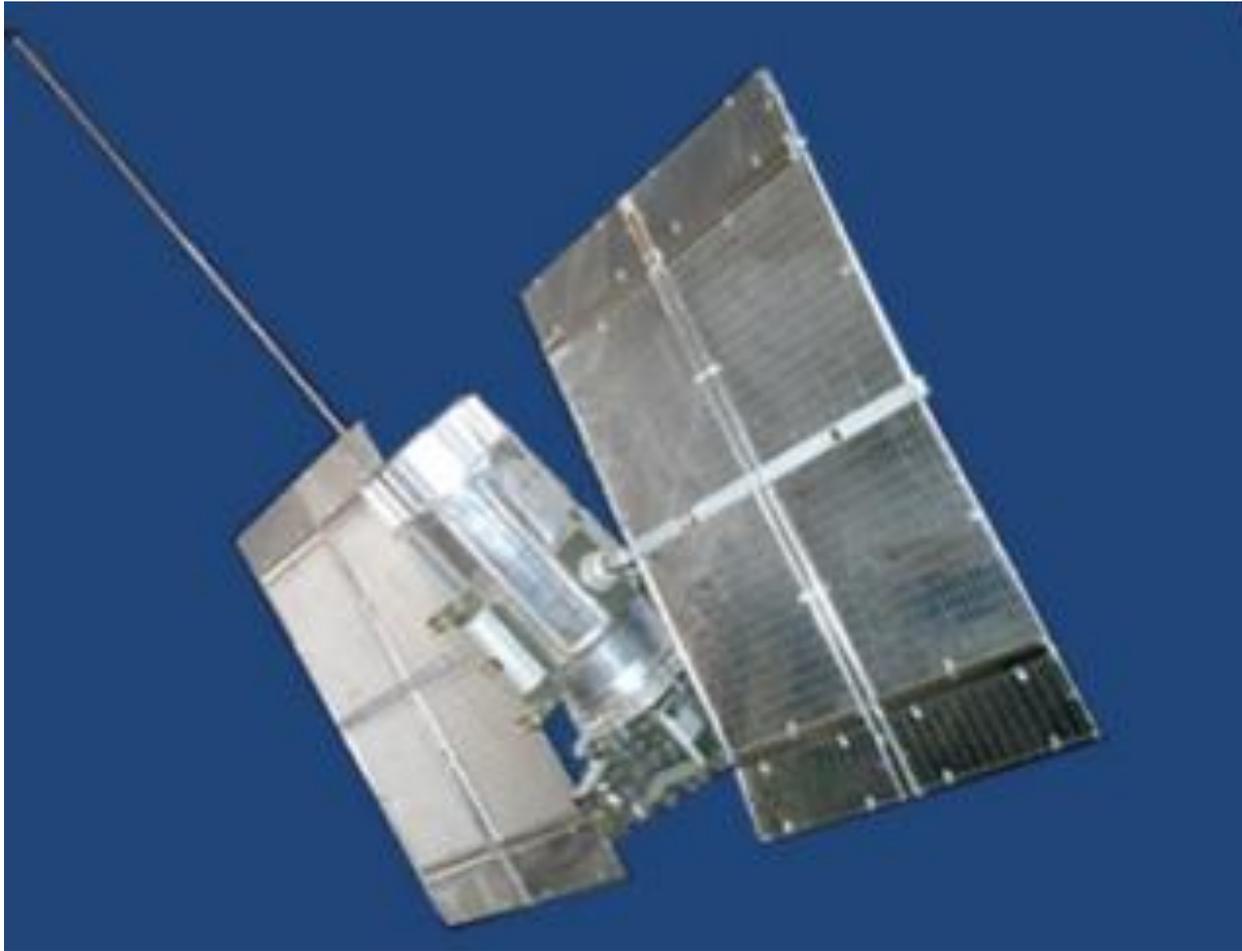
Estrutura do Sistema GPS

- Segmento de controle
 - Responsável pelo monitoramento do sistema de satélites e do tempo GPS, pela predição dos elementos orbitais e pela atualização periódica da mensagem de navegação.
- Segmento de usuários
 - Posicionamento topográfico e geodésico;
 - navegação aérea, marítima e terrestre
- Segmento Espacial
 - Constelação de satélites.

Estrutura do Sistema GPS

- Segmento Espacial
 - 27 satélites (24+3 reservas)
 - 6 planos orbitais
 - 55° de inclinação dos planos orbitais em relação ao equador
 - 20 200 km de altura da superfície da Terra
 - 12 hs siderais de período
 - até 5 horas acima do horizonte.

Satélite GLONASS



Fonte: <http://www.glonass-center.ru/>

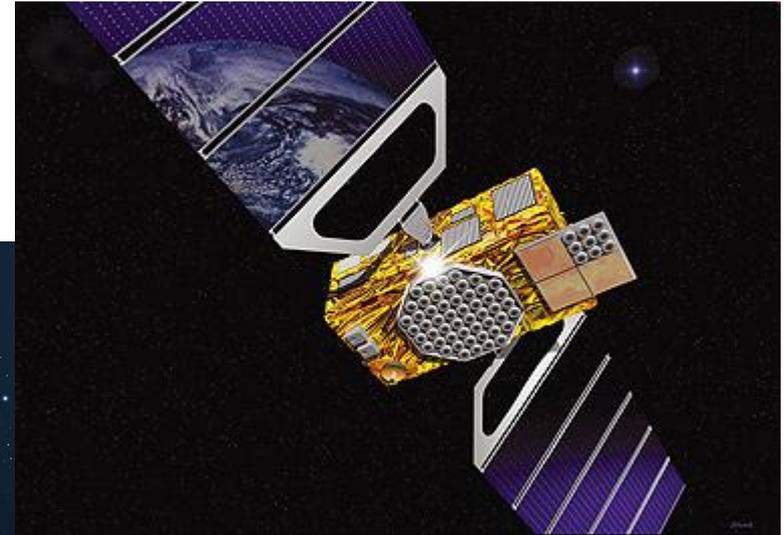
Estrutura do Sistema

- Sistema GLONASS – antiga URSS
 - 1º bloco lançado em 1982
- Estrutura
 - 24 satélites
 - 3 planos orbitais
 - 64,8° de inclinação em relação ao equador
 - 19100 km sobre a superfície da Terra.

Estrutura do Sistema

- Sinais transmitidos GLONASS
 - 2 portadoras com freqüências diferentes:
 - $L1 = 1602\text{MHz}$ / $L2 = 1246\text{MHz}$
 - Cada satélite possui uma freqüência diferente
 - $L1 = 1602 + (n \times 0,5625)\text{ MHz}$
 - 2 Tipos de sinais
 - Precisão padrão – uso civil – 70m (99,7%)
 - Alta precisão – uso militar.

Satélite GALILEO



Fonte: <http://www.esa.int/>

Estrutura do Sistema

- Sistema GALILEO – União Européia
 - Primeiro satélite lançado 2005
 - Operacional em 2008...
- Estrutura
 - 30 satélites (27 + 3 reserva)
 - 3 planos orbitais
 - 56° de inclinação em relação ao equador
 - 24000 km sobre a superfície da Terra.

Estrutura do Sistema

- Freqüências GALILEO
 - E5 = 1164 – 1215 MHz
 - E6 = 1260 – 1300 MHz
 - L1 = 1559 – 1593 MHz
- Tipos de sinais
 - Serviço aberto (OS)
 - Serviço de segurança (SoL)
 - Serviço Comercial
 - Serviço regulado ao público
 - Serviço de procura e resgate.

GPS - Sinais Transmitidos



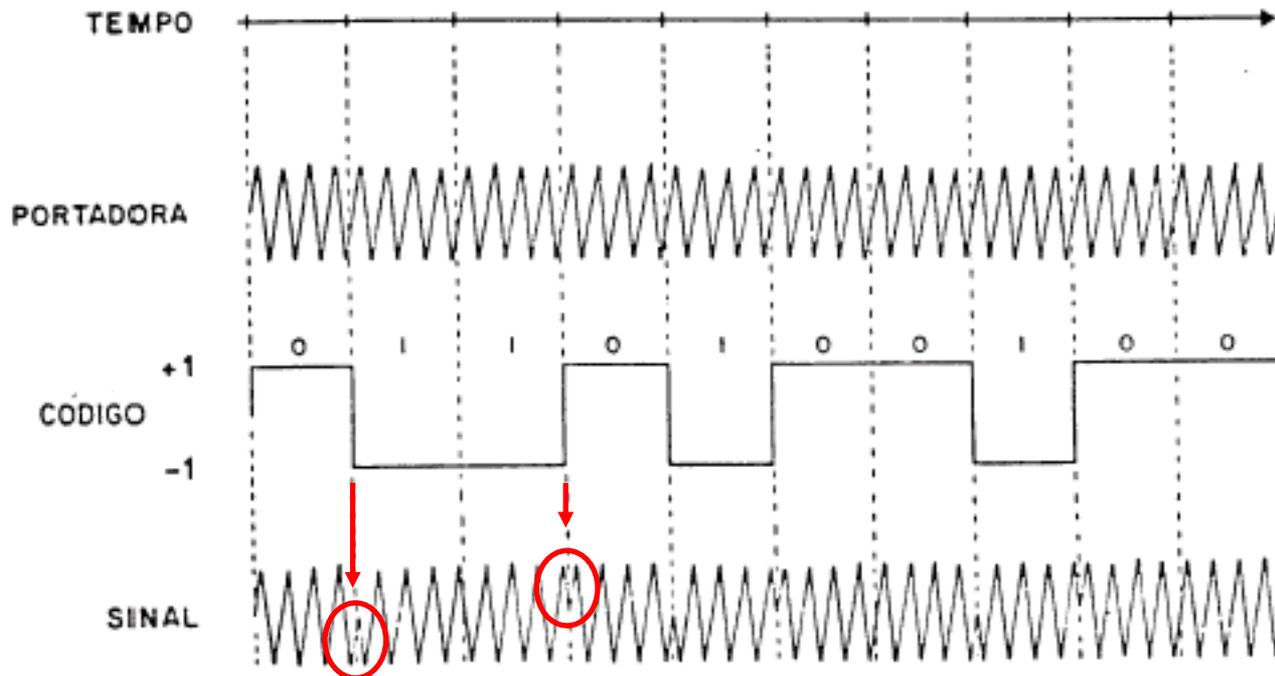
- 3 portadoras com frequências distintas:
 - $L1 = 154 \times 10,23 \text{ MHz} = 1575,42 \text{ MHz}$
 - $L2 = 120 \times 10,23 \text{ MHz} = 1227,60 \text{ MHz}$
 - $L5 = 115 \times 10,23 \text{ MHz} = 1176,45 \text{ MHz}$
 - comprimentos de onda de 19,05 cm, 24,45 cm e 25 cm respectivamente.
 - Banda L1: 1563,42 - 1587,42
 - Banda L2: 1215,6 - 1239,6
 - Banda L5: 1164,45 –1188,45 MHz
- 2 códigos:
 - C/A (Clear Access): usado em navegação geral
 - P (Precision): estrito ao uso militar.

Sinais Transmitidos

- Todas as informações sobrepostas às portadoras são moduladas em fase.
 - Em L1 os códigos C/A e P estão defasados:
 - o código P é modulado na fase cosseno
 - e o código C/A na fase seno
 - A vantagem é que a portadora pode ser obtida através de um dos códigos independente do outro
 - Em L2 é transmitido somente o código P.

Sinais Transmitidos

- Modulação em fase



Sinais Transmitidos

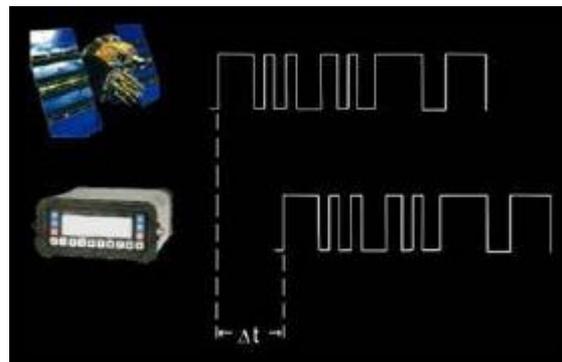
- Efemérides:
 - Parâmetros para a predição da posição do satélite na órbita;
 - Recebido em 30s;
 - Satélite transmite:
 - Tempo GPS;
 - Parâmetros orbitais;
 - Saúde dos satélites;
 - Ionosfera.

Equação dos sinais

- $L_1(t) = A_p P_i \cos(\omega_1 t + f(t)) + A_g G_i(t) D_i(t) \text{sen}(\omega_1 t + f(t))$
- $L_2(t) = B_p P_i(t) D_i(t) \cos(\omega_1 + f(t))$
- Onde:
 - A, B - amplitudes dos sinais
 - P, G - códigos P e C/A respectivamente
 - D - dados transmitidos.

Tempo GPS

- O tempo GPS é controlado por 2 osciladores de césio ou rubídio existentes no satélite, precisão de 10^{-9} s/dia, ou seja, 1 bilhão de dias para errar 1s
- Os receptores possuem um oscilador de quartzo, precisão de 10^{-3} s/dia
- O não sincronismo gera erro na medida da distância do receptor ao satélite.



Tempo GPS

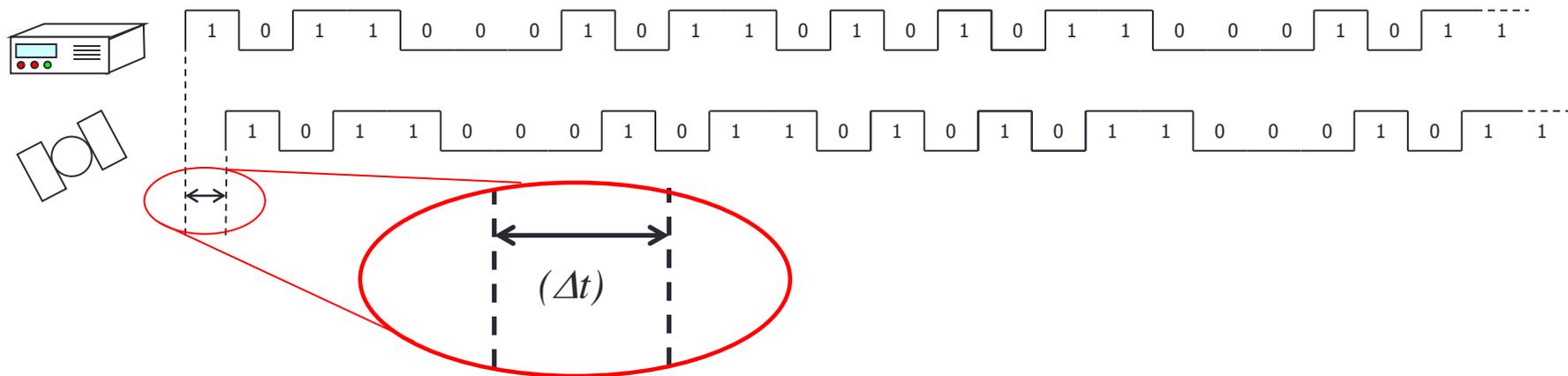
- O tempo GPS nada mais é do que um sistema de tempo atômico
- Origem inicial: 0 horas UTC do dia 6 de janeiro de 1980
- O modo de contagem é dado por duas variáveis:
 - a semana GPS
 - contador Z

Tempo GPS

- **Semana GPS:**
 - Teve início em 1980 e perdurou por 1023 semanas até 1999
 - Às 0h UTC de 21 de agosto de 1999 reiniciou em 0.
 - Os receptores precisaram reconhecer esta nova origem de contagem da semana
- **Contador Z:**
 - representa o número inteiro de 1,5 segundos de tempo decorridos desde o início semana (0h de domingo)
 - Varia de 0 a 403199

Tempo GPS

- Obtenção do tempo de viagem do sinal
 - Uso do código C/A:
 - Princípio da correlação entre os sinais
 - O código C/A é gerado no interior do receptor e comparado com o código C/A do sinal recebido
 - obtém-se o atraso entre os sinais (Δt).



Posicionamento pelo uso do código

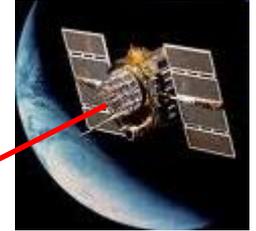
- Pseudodistância entre o receptor e o satélite:
 - $d_i = c \cdot \Delta t_i$
 - c - velocidade da luz
 - Δt_i - tempo de propagação do sinal entre o satélite i e a estação - derivado através de um dos códigos C/A ou P
- Incógnitas Envolvidas:
 - X_r, Y_r, Z_r – Coordenadas da estação
 - ε – Erro de sincronização do relógio do receptor em relação à constelação de satélites.

*Sat.2* (X_2, Y_2, Z_2)

$$d_2 = c.(\Delta t_2 + \varepsilon)$$

*Sat.3* (X_3, Y_3, Z_3)

$$d_3 = c.(\Delta t_3 + \varepsilon)$$

*Sat.4* (X_4, Y_4, Z_4)

$$d_4 = c.(\Delta t_4 + \varepsilon)$$

*Sat.1* (X_1, Y_1, Z_1)

$$d_1 = c.(\Delta t_1 + \varepsilon)$$

*Receptor* (X_r, Y_r, Z_r)

Cálculo da Pseudodistância

- $d_i = c.(\Delta t_i + \varepsilon)$ (1)
 - d_i - Pseudodistância do satélite i ao receptor
 - c - velocidade da luz
 - Δt_i - tempo de viagem do sinal.
 - ε - Erro de sincronização do relógio do receptor em relação aos satélites
- $d_i = [(X_i - X_r)^2 + (Y_i - Y_r)^2 + (Z_i - Z_r)^2]^{1/2}$ (2)
 - Distância cartesiana.

Cálculo da Posição

- Igualando as equações (1) e (2)

- $c.(\Delta t_i + \varepsilon_i) = [(X_i - X_r)^2 + (Y_i - Y_r)^2 + (Z_i - Z_r)^2]^{1/2}$

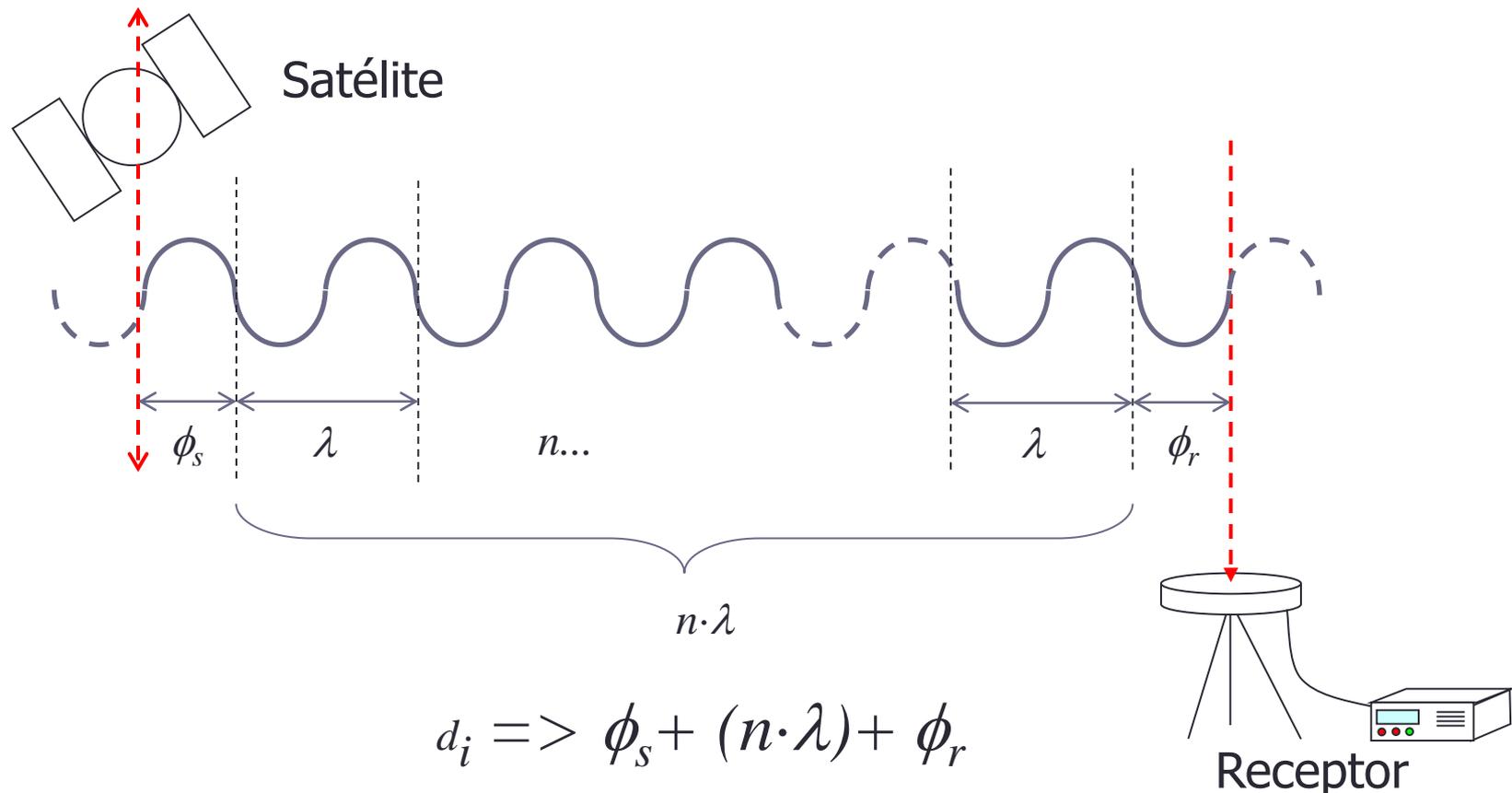
- Sistema para 4 satélites e o receptor:

$$\left\{ \begin{array}{l} c.(\Delta t_1 + \varepsilon) = [(X_1 - X_r)^2 + (Y_1 - Y_r)^2 + (Z_1 - Z_r)^2]^{1/2} \quad - \text{satélite 1} \\ c.(\Delta t_2 + \varepsilon) = [(X_2 - X_r)^2 + (Y_2 - Y_r)^2 + (Z_2 - Z_r)^2]^{1/2} \quad - \text{satélite 2} \\ c.(\Delta t_3 + \varepsilon) = [(X_3 - X_r)^2 + (Y_3 - Y_r)^2 + (Z_3 - Z_r)^2]^{1/2} \quad - \text{satélite 3} \\ c.(\Delta t_4 + \varepsilon) = [(X_4 - X_r)^2 + (Y_4 - Y_r)^2 + (Z_4 - Z_r)^2]^{1/2} \quad - \text{satélite 4} \end{array} \right.$$

Incógnitas ($\varepsilon, X_r, Y_r, Z_r$) \rightarrow Coordenadas da estação (ϕ, λ, h)

Posicionamento pelo uso da portadora

- Distância pela diferença de fase



Cálculo da Distância

- Distância pela fase
 - Uso da portadora:
 - Medida da fase de batimento da portadora
 - No início da observação não se conhece o número inteiro de ciclos entre o satélite e o receptor
 - Aplicam-se técnicas para a solução da ambiguidade
 - Multiplicando-se o número de ciclos pelo comprimento de onda $\lambda = c/f$ faz-se a conversão em unidades lineares.

Cálculo da Distância

- Medida de fase de batimento da portadora

- $\varphi_r^i(t) = \varphi^i(t) - \varphi_r(T)$

- Onde:

- $\varphi_r^i(t)$ -observação da fase de batimento da portadora, em unidades de ciclos, entre o satélite (i) e o receptor (r), para a época (t)
 - $\varphi^i(t)$ -fase do sinal recebido, transmitido pelo satélite (i) na época (t), medida em ciclos
 - $\varphi_r(T)$ -fase do sinal gerado no receptor (r) na época (T) em que o sinal transmitido chega ao receptor, medida em ciclos.

Distância pela fase

- Tempo de propagação:

- $\delta\tau = T - t$ (3)

- $\delta\tau = (\rho_r^i / c) + (\delta A_r^i / c)$ (4)

- $\varphi^i(t) = \varphi^i(T - \delta\tau)$

- Linearizando por Taylor

- $\varphi^i(t) = \varphi^i(T) - (\partial\varphi^i/\partial t) \delta\tau = \varphi^i(T) - f \delta\tau$

- Substituindo:

- $\varphi_r^i(T) = \varphi^i(T) - \varphi_r(T) - (f/c) \rho_r^i - (f/c) \delta A_r^i$ ou

- $\varphi_r^i(T) = \varphi^i(T) - \varphi_r(T) - (f/c) \rho_r^i + N_r^i - (f/c) \delta A_r^i$ (5)

Ambiguidade

- Onde:

- $\rho_r^i = [(X_i - X_r)^2 + (Y_i - Y_r)^2 + (Z_i - Z_r)^2]^{1/2}$ – Distância cartesiana

- $\delta A_r^i =$ atraso ionosfera + troposfera

Distância pela fase

- Multiplicando-se a equação (5) por $\lambda = c/f$ obtém-se unidades lineares invés de ciclos:

- $$D\varphi_r^i = \rho_r^i + \lambda N_r^i + c \Delta t_{Ar}^i + c(\Delta t_r - \Delta t^i) \quad (6)$$

Ambiguidade

- A ambiguidade do receptor (N_r) representa o número inteiro de ciclos contidos na distância satélite-receptor no instante do começo da medida de fase
- Os dois últimos termos incluem as frações de ciclo no receptor e no satélite bem como o erro de sincronização dos respectivos relógios.

Simple difference of phase

- Applying equation (5) of the phase difference for two stations A and B and the same satellite 'i' we have:

$$\bullet \varphi_{AB}^i(T) = \varphi_B^i(T) - \varphi_A^i(T) = \varphi_{AB}(T) + (f/c) \rho_{AB}^i + N_{AB}^i + (f/c) \delta A_{AB}^i \quad (7)$$

- In this equation disappears the term relative to the phase fraction in the satellite. It creates a correlation between the observations of stations A and B.

Dupla diferença de fase

- Aplicando a equação (7) da simples diferença de fase para dois satélites i e k :
- $$\varphi_{AB}^{ik}(T) = \varphi_B^k(T) - \varphi_A^i(T) = (f/c) + \rho_{AB}^{ik} + N_{AB}^{ik} + (f/c) \delta A_{AB}^{ik} \quad (8)$$
- Desaparece o termo correspondente à fração de ciclo na estação
- Entretanto, haverá mais uma correlação:
 - De um satélite para o outro.

Tripla diferença de fase

- Aplicando a equação (8) da dupla diferença de fase para dois instantes consecutivos (T_1 e T_2) dos satélites, tem-se:

$$\begin{aligned} \bullet \varphi_{AB}^{ik}(T_{1,2}) = \varphi_B^k(T_2) - \varphi_A^i(T_1) = (f/c) [\rho_{AB}^{ik}(T_2) - \rho_{AB}^{ik}(T_1)] + \\ + (f/c) [\delta A_{AB}^{ik}(T_2) - \delta A_{AB}^{ik}(T_1)] \quad (9) \end{aligned}$$

- Esta equação é totalmente isenta da ambiguidade. Apresenta, porém, várias correlações. Permite a obtenção rápida de coordenadas, sem muita confiabilidade, uma vez que, em geral, torna-se difícil levar em consideração as correlações.

Solução da ambiguidade

- Método geométrico
 - Geometria favorável (períodos longos)
 - Não pode haver perda de ciclos
 - Obtém-se inicialmente as coordenadas pela tripla diferença e daí as distâncias
 - Compara com distâncias ambíguas e deriva-se valores para as ambiguidades.
 - Bons resultados em curtas distâncias.

Solução da ambiguidade

- **Combinação do código e da portadora**
 - Fase do código não é ambígua
 - Medidas de fase do código usadas como comprimento adicional
 - Independe da geometria
 - Exige baixo nível de ruído –só é possível com o código P
- Método de pesquisa da ambiguidade
 - Pesquisa a combinação ótima da ambigüidade para L1, L2 ou sinais derivados -técnicas de otimização
 - número de operações matemáticas aumenta rapidamente
 - Na banda larga a solução é mais fácil
 - Permite a resolução rápida – cinemático
 - Vale-se do caráter inteiro da ambigüidade
 - Sensível a erros sistemáticos
 - Exige número grande de satélites (≥ 8).

Solução da ambiguidade

- **Combinação do código e da portadora**
 - Método combinado
 - Combinação de todas as possibilidades anteriores
 - Cada valor fixado melhora e estabiliza a solução no passo seguinte - Isto vale para as frequências originais e para as combinações.

Erros do Sistema

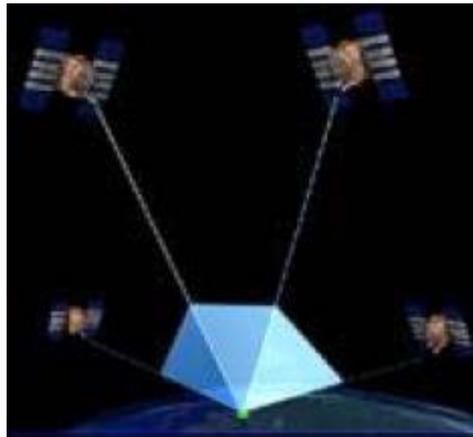
- Erros sistemáticos envolvidos:
 - Observáveis GPS: pseudodistância e fase;
 - Satélite: erro da órbita, erro do relógio, relatividade e atraso entre as duas portadoras;
 - Propagação do sinal: troposfera, ionosfera, perda de ciclos, multicaminhamento e rotação da Terra.

Erros do Sistema

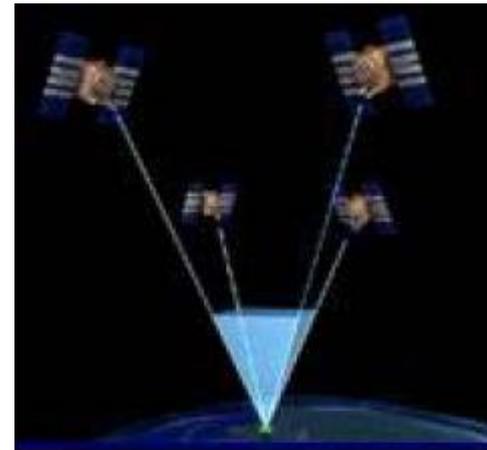
- Erros sistemáticos envolvidos:
 - Receptor/antena: erro do relógio, canais e centro de fase;
 - Estação: erro nas coordenadas, multicaminhamento, marés terrestres, movimento do pólo, carga dos oceanos e pressão atmosférica;
 - Usuários e casualidades.

DOP – Diluição da Precisão

- O PDOP pode ser interpretado como o inverso do volume formado pelos 4 satélites e a antena do receptor



PDOP bom



PDOP ruim

Receptores

- Composição
 - Antena com pré-amplificador;
 - Seção de rádio frequência;
 - Microprocessador;
 - Oscilador que gera uma frequência intermediária do sinal;
 - Painel;
 - Provisão de energia;
 - Memória.

Receptores Navegação



Receptores SIG



Receptores Topográficos



Receptores para Telemetria

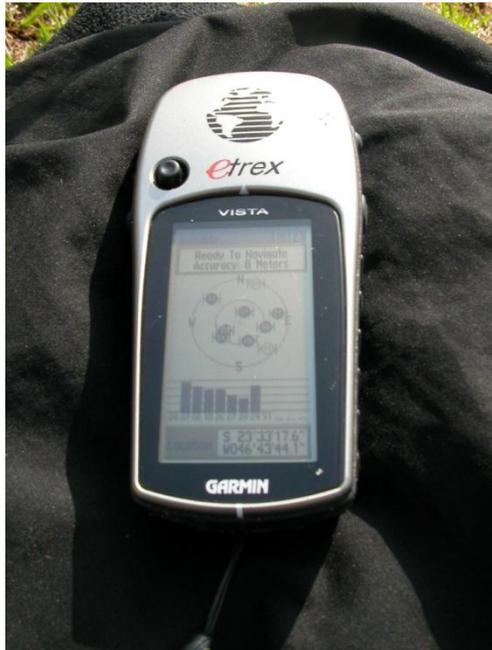


Técnicas de Posicionamento

- O Posicionamento pode ser realizado de modo:
 - Estático
 - Absoluto
 - GPS Navegação – até 6m
 - PPP - Posicionamento por Ponto Preciso – 10 cm
 - Relativo – milímetro
 - DGPS (diferencial) – 1m
 - RTK - *Real Time Kinematic* (diferencial) – 1 a 2cm
 - Cinemático
 - Absoluto
 - GPS navegação 10 a 15m
 - PPP - Posicionamento por Ponto Preciso – 1m
 - Relativo – Décimos de centímetro
 - DGPS (diferencial) – 1m
 - RTK - *Real Time Kinematic* (diferencial) – 1 a 2cm
 - Semi-cinemático (*Stop and go*).

Técnicas de Posicionamento

- Estático absoluto:
 - Técnica de observação (rastreo) realizada com um receptor estático



GPS Navegação

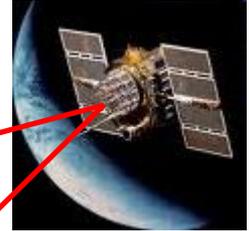
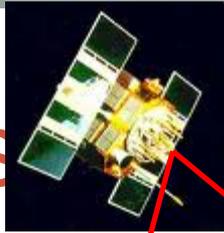
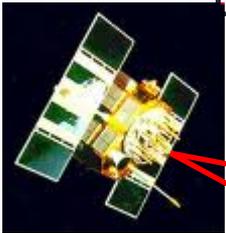


GPS Topográfico

Técnicas Posicionamento

- Estático relativo:

Receptor estático e uma base



Estação referência



Estação móvel

Técnicas de Posicionamento

- Cinemático absoluto:
 - Técnica de observação (rastreo) realizada com um receptor em movimento

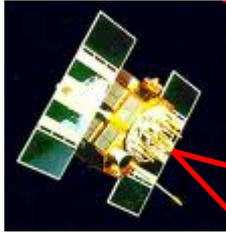
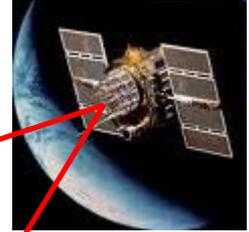
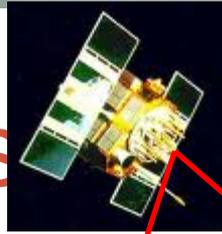


GPS Navegação



GPS Topográfico

Técnicas Posicionamento



- Cinemático relativo:
Receptor em movimento e uma base



Estação referênci



DGPS



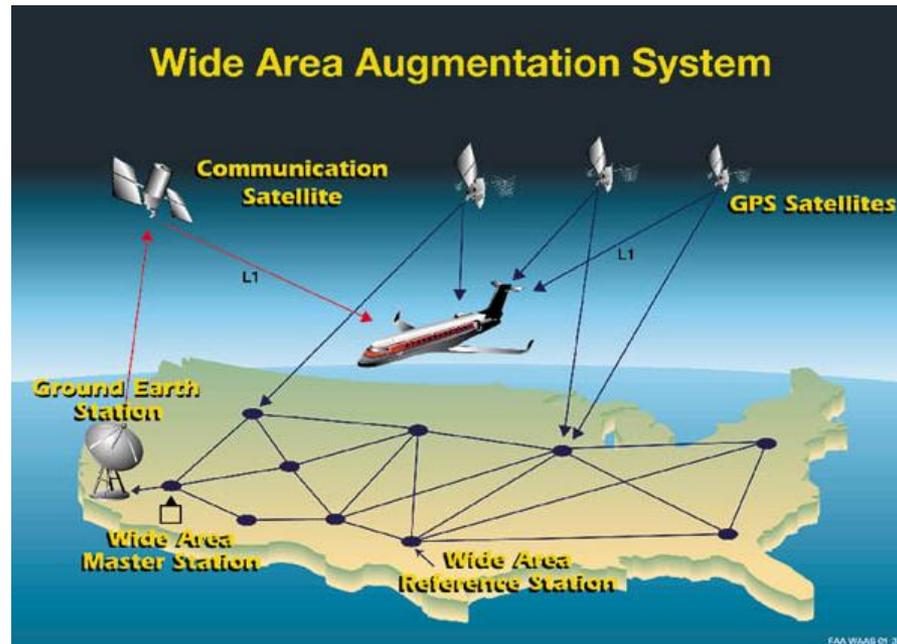
RTK



GPS Topográfico

Técnicas de Posicionamento

- DGPS – Correção diferencial transmitida por satélite
 - WAAS – Wide Area Augmentation System
 - EGNOS – European Geostationary Overlay Service.



Revisão

- Histórico e a estrutura do sistema GPS
- Apresentação dos sistemas Glonass e Galileo
- Características dos sinais transmitidos
- Técnicas de obtenção da coordenadas pelo uso do código e da portadora
- Erros do sistema
- Receptores
- Técnicas de posicionamento.

Referências

- BERALDO, P.; SOARES, S. M. **GPS - introdução e aplicações práticas**. Brasília: Luana, 1995.
- MONICO, J. F. G. - **Posicionamento pelo Navstar-GPS: descrição, fundamentos e aplicações**. São Paulo. Editora UNESP, 2000;
- GEMAEL, C. – **Introdução à Geodésia Física**, Editora UFPR, 1999.
- GEMAEL, C.; DE ANDRADE, J. B. – **Geodésia Celeste**, Editora UFPR, 2004.
- HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; COLLINS, J. - **GPS Theory and Practice**, Ed. Springer-Verlag Wien. 5ed., 2001.