



TÉCNICO EM **AGRIMENSURA**

Módulo III

Topografia III



Quadra 101, Conjunto 2, Lote 01, Sobreloja
Recanto das Emas, Brasília/DF

61 **3082.1060**
ineprotec.com.br

TOPOGRAFIA -III

Ficha Técnica

Elaboração: INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA - DEPARTAMENTO ACADÊMICO DA CONSTRUÇÃO CIVIL - **Profs.** Ivandro Klein, Matheus Pereira Guzatto e Rovane Marcos de França

Capa / Diagramação - Gabriel Araújo Galvão

Diretor Pedagógico - Edilvo de Sousa Santos

Índice

Sistema GNSS.....	05
Observáveis GNSS e Órbias dos Satélites	25
Erros Envolvidos no Posicionamento GNSS.....	43
Posicionamento por Pontos Simples (PPS)	56
GNSS Diferencial (DGNSS).....	59
Posicionamento por Ponto Preciso (PPP)	66
Posicionamento Relativo (PR)	70
Solução das Ambiguidades	82
Principais Referências	87

1. Sistemas GNSS

O sistema TRANSIT, também conhecido com NAVSAT (do inglês *navy navigation satellite system* – sistema de navegação por satélite da marinha), foi o primeiro sistema de navegação por satélite, sendo desenvolvido a partir de 1958 e entrando em serviço em 1964. O TRANSIT foi inicialmente utilizado pela marinha dos Estados Unidos para obter informações precisas sobre o posicionamento de submarinos lançadores de mísseis balísticos, sendo também utilizado em navegação, vigilância hidrográfica e levantamentos geodésicos.

Em estágio operacional, o TRANSIT possuía pelo menos dez satélites em órbitas polares de baixa altitude (cerca de 1100 km), com um período orbital de cerca de 106 minutos. A posição do observador (receptor TRANSIT) era obtida utilizando o efeito Doppler, rastreando o sinal de um satélite no instante de sua passagem, com uma precisão posicional de centenas de metros (Figura 1.1). O sistema TRANSIT ficou obsoleto com a entrada e operação do GPS (*Global Positioning System* – sistema de posicionamento global), a partir da década de 80, e foi encerrado em 1996. Após 1996, os satélites TRANSIT foram mantidos em atividade, mas para outros fins: eles passaram a integrar o sistema de monitoramento da ionosfera da Marinha.

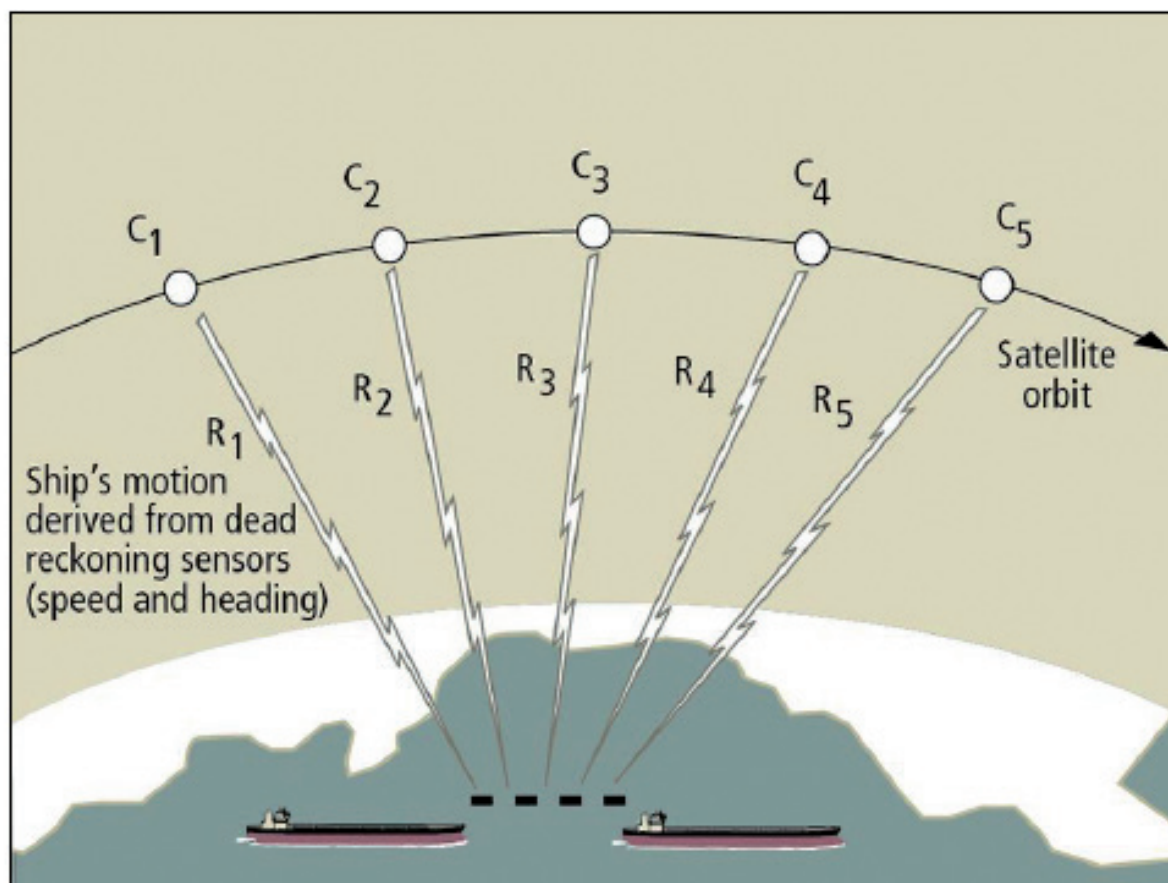


Figura 1.1 – Sistema TRANSIT de radio navegação.

Em paralelo ao desenvolvimento do GPS e de forma independente, na antiga URSS (União das Repúblicas Socialistas Soviéticas), foi desenvolvido o GLONASS (*GLobal Orbiting NAVigation Satellite System* – sistema de navegação global por satélites orbitais), um sistema muito similar ao GPS. No final da década de 1990, a Agência Espacial Europeia propôs o desenvolvimento do Galileo. Esse sistema ainda está em fase de desenvolvimento, sendo que o primeiro satélite foi lançado em 2005. Além desses, nos anos 90 a China passou a desenvolver o seu próprio sistema de navegação por satélite, atualmente denominado Beidou ou Compass.

De forma geral, esses sistemas têm sido chamados de GNSS (*Global Navigation Satellite System* – sistema global de navegação por satélite), nome concebido em 1991, durante a 10ª Conferência de Navegação Aérea, quando a Associação Internacional de Aviação Civil reconheceu que a fonte primária para a navegação aérea do século XXI será o GNSS.

1.1. NAVSTAR-GPS

O NAVSTAR-GPS, ou apenas GPS, é um sistema de rádio navegação desenvolvido pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos da América, visando ser o principal sistema de navegação das forças armadas americanas. Tem sido desenvolvido desde 1973 e resultou da fusão de dois programas financiados pelo governo americano: TIMATION (marinha) e SYSTEM 621 B (força aérea), sendo declarado oficialmente operacional em 27 de Abril de 1995, isto é, com 24 satélites em órbita, garantindo cobertura global e disponibilidade contínua, embora já fosse utilizado pelos norte-americanos desde 1983.

Devido à alta precisão proporcionada pelo sistema e o grande desenvolvimento da tecnologia envolvida nos receptores GPS, uma grande comunidade usuária emergiu nos mais variados segmentos da sociedade civil, ou seja, o sistema passou a ter também um caráter comercial, e não apenas militar, para o qual foi inicialmente concebido. Para os usuários das áreas de Geodésia e Topografia, uma característica muito importante da tecnologia GPS em relação aos métodos de levantamentos até então convencionais, utilizando teodolitos, distanciômetros ou estações totais, é a não necessidade de intervisibilidade entre as estações, para efetuar leituras de ré e vante, por exemplo. Além disso, o GPS pode ser usado sob quaisquer condições climáticas, tem cobertura global e disponibilidade contínua, isto é, pode ser utilizado por um usuário em qualquer parte do mundo em qualquer instante.

O GPS fornece o posicionamento 3D do receptor (usuário) mais um padrão preciso de tempo, podendo fornecer um posicionamento horizontal instantâneo (posicionamento por ponto simples) com precisão da ordem de metros. Entretanto, utilizando métodos mais sofisticados de posicionamento, envolvendo dois ou mais receptores, por exemplo, a precisão resultante pode ser centimétrica ou até mesmo milimétrica.

O princípio básico de posicionamento pelo GPS consiste na medida de distâncias entre o receptor e no mínimo quatro satélites em um determinado instante (Figura 1.2). Conhecendo, também, as coordenadas 3D dos satélites, pode-se determinar as coordenadas 3D do receptor, sendo que, do ponto de vista geométrico, apenas três distâncias seriam suficientes, ou seja, o rastreamento de apenas três satélites. A quarta medida (quarto satélite) é necessária devido ao erro do relógio do receptor, gerando uma nova incógnita ao problema e formando um sistema de quatro equações (distâncias) com quatro incógnitas (coordenadas 3D e o erro do relógio do receptor).

Este princípio refere-se ao posicionamento por ponto simples, empregado nos receptores de navegação e nos *smartphones* em geral. Existem ainda outros métodos de posicionamento, como será visto em capítulos posteriores. Combinando o posicionamento instantâneo em diferentes épocas com o intervalo de tempo, é possível derivar ainda a velocidade do receptor GPS, no caso do mesmo se encontrar em movimento, como por exemplo, a bordo de um veículo.

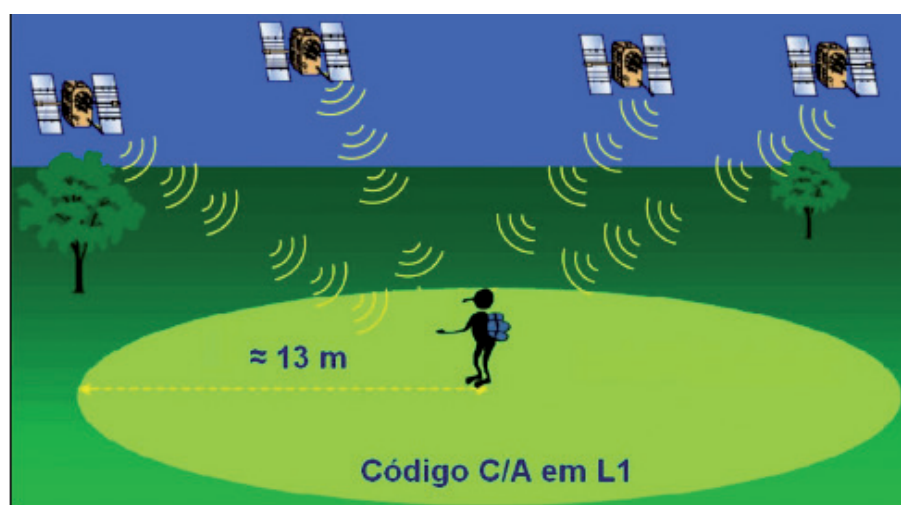


Figura 1.2 – Princípio do posicionamento GPS por ponto simples.

O GPS disponibiliza dois tipos de serviços para o posicionamento por ponto simples: O SPS (*Standard Positioning Service* – serviço de posicionamento padrão), e o PPS (*Precise Positioning Service* – serviço de posicionamento preciso). O SPS é um serviço de posicionamento e tempo padrão, aberto aos usuários civis. Até 1º de maio de 2000, o SPS proporcionava uma exatidão posicional da ordem de centenas de metros. O PPS permite obter melhores resultados, da ordem de metros. Em contrapartida, seu serviço é disponível somente aos militares dos EUA e usuários autorizados.

Essa restrição de uso do GPS é realizada por meio da introdução das técnicas AS (*Anti Spoofing* – anti-falsificação) e SA (*Selective Availability* – disponibilidade seletiva). A AS é um processo de criptografia do código P (código mais preciso transmitido nos sinais GPS), visando protegê-lo de imitação por usuários não autorizados. A SA foi introduzida no sistema por meio de dois mecanismos, sendo eles: a manipulação das efemérides transmitidas, isto é, a inserção de erros nos parâmetros das órbitas (posições) dos satélites e na frequência do relógio dos satélites. A SA foi desativada no dia 02 de maio de 2000, e com isto melhorou em cerca de dez vezes a precisão proporcionada pelo GPS para os usuários civis (ver a Figura 1.3). Entretanto, a técnica AS permanece ativa e em tempos de guerra a técnica SA pode ser novamente acionada.

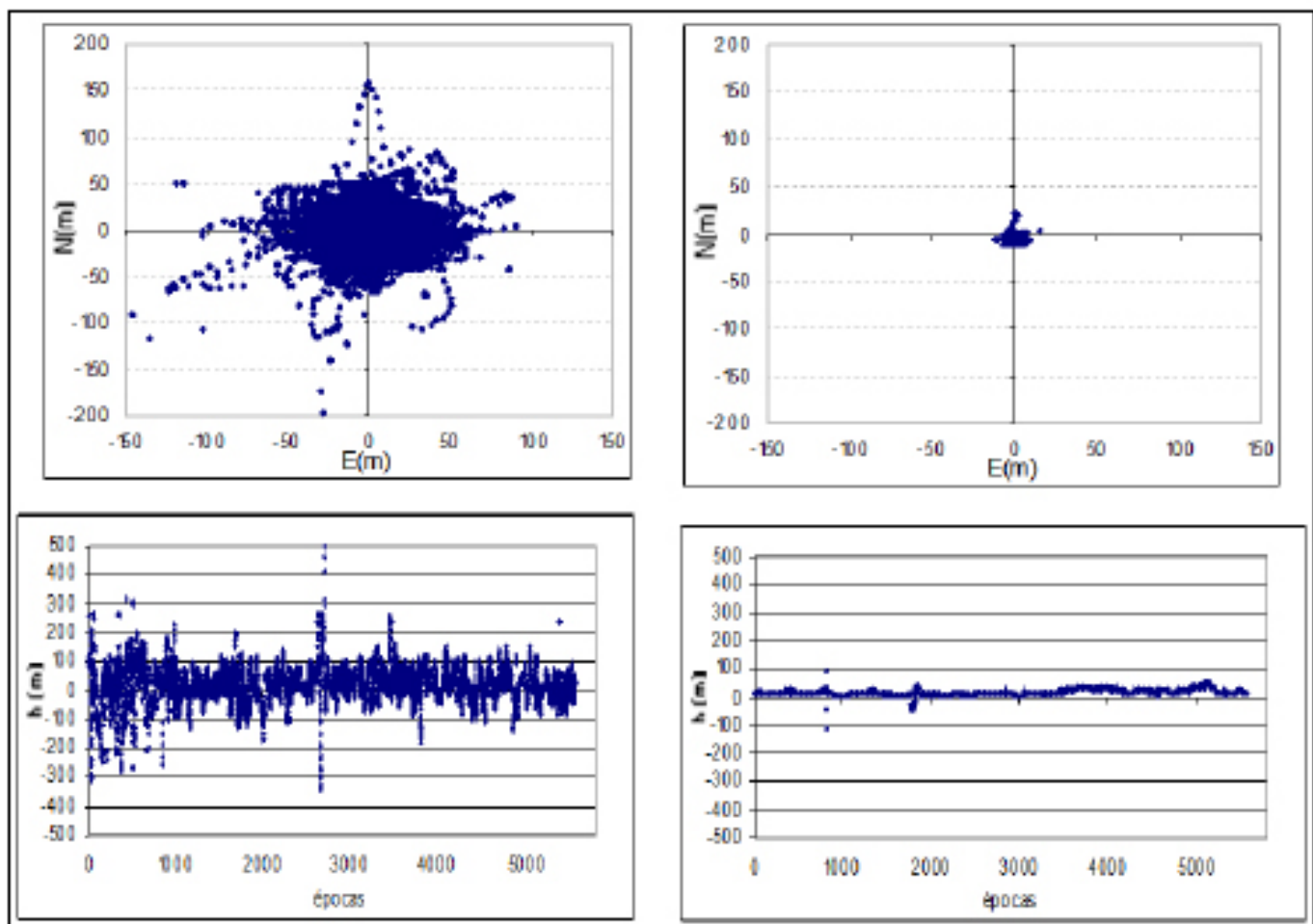


Figura 1.3 – Discrepância das coordenadas planimétricas (acima) e altimétrica (abaixo) antes (a direita) e após (a esquerda) a desativação da técnica SA na estação UEPP (atual PPTe) em São Paulo.

O GPS se divide em três segmentos: espacial (relativo aos satélites em órbita), controle (relativo às estações terrestres monitoras) e de usuários (Figura 1.4). A Figura 1.5 apresenta as principais características do segmento espacial.

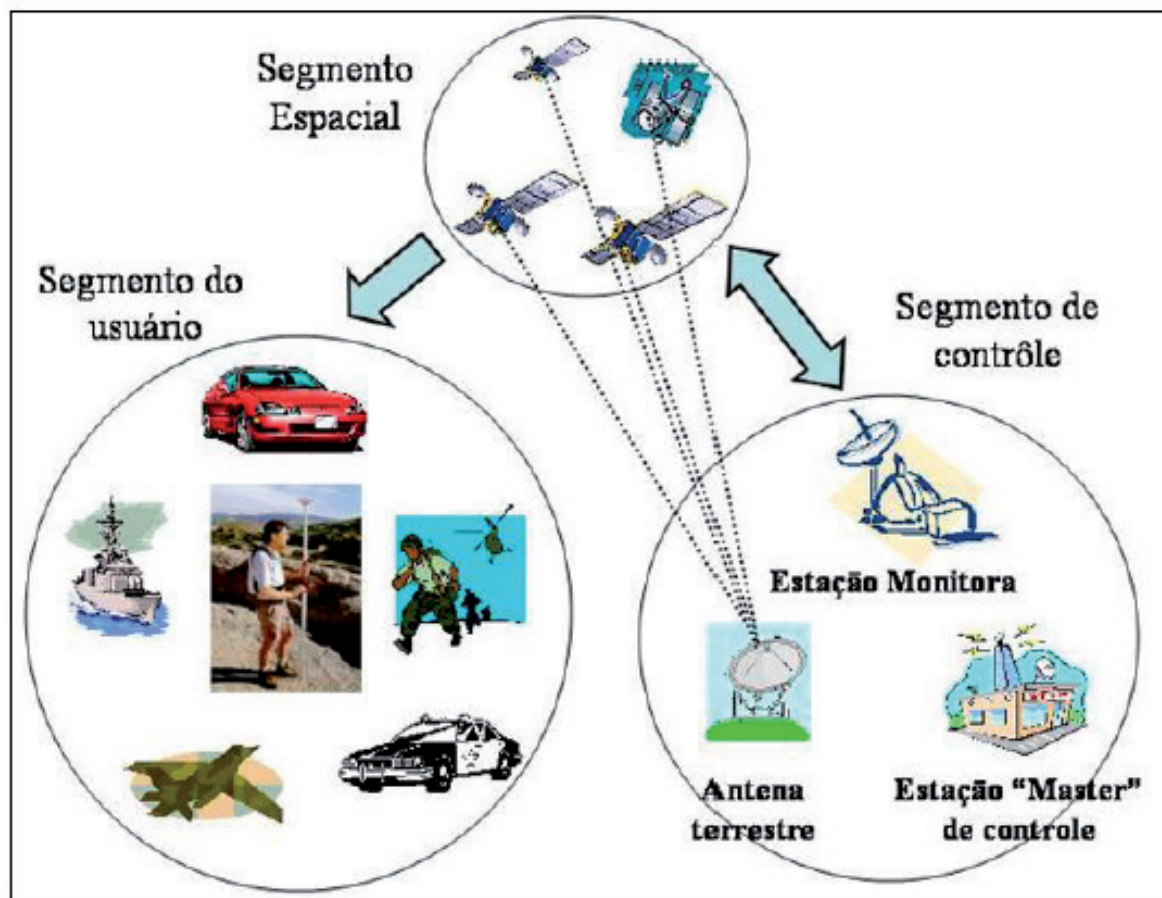


Figura 1.4 – Segmentos do sistema GPS.

Um satélite GPS realiza uma volta completa na Terra em um período de cerca de 12 horas, sendo que o tempo máximo que um satélite fica acima do horizonte de um observador é de 5 horas (Figura 1.6). Os satélites GPS são constantemente substituídos (modernizados), sendo que o status atual da constelação GPS pode ser consultado no seguinte endereço eletrônico: <http://www.usno.navy.mil/USNO/time/gps/current-gps-constellation>.

Quanto ao segmento de controle, as principais tarefas são: monitorar e controlar continuamente o sistema de satélites; determinar o sistema de tempo GPS; prever as órbitas dos satélites e calcular as correções dos relógios dos satélites; atualizar periodicamente as mensagens de navegação (efemérides transmitidas) de cada satélite. O sistema de controle é composto por cinco estações monitoras: Hawaii, Kwajalein, Ascension Island, Diego Garcia e Colorado Springs (Figura 1.7). Três delas possuem antenas para transmitir os dados aos satélites (Kwajalein, Ascension Island, Diego Garcia). Uma das estações é de controle central (Master), localizada em Colorado Springs. Essas cinco estações pertencem a AAF (*American Air Force* – força aérea americana). Cada estação monitora é equipada com oscilador externo de alta precisão (relógio atômico) e receptor GPS, o qual rastreia todos os satélites visíveis e transmite os dados para a estação Master. Os dados são processados na estação Master para determinar as órbitas dos satélites e correções dos relógios dos satélites, atualizando periodicamente as mensagens de navegação (efemérides transmitidas). A informação atualizada é transmitida aos satélites a partir das antenas terrestres. Desde 1994, sete estações do NIMA (*National Imagery and Mapping Agency* – agência de mapeamento e imageamento nacional) também fazem parte das estações monitoras.

- **24/27 satélites na constelação final**
 - ✓ **6 planos orbitais com inclinação 55°**
 - ✓ **4 satélites em cada plano orbital**
- **Órbita muito alta**
 - **20 183 km (12 545 milhas)**
 - **período de 12 horas siderais**
 - **precisão geodésica**
 - **grande autonomia**
 - **cobertura global**



Figura 1.5 – Configuração do segmento espacial.



Figura 1.6 – Imagem de satélite a uma altitude de 20200 km com Florianópolis ao centro (zênite).

Os usuários do GPS podem ser classificados basicamente em civis e militares. Entretanto, a classificação dos usuários pode ser feita por meio dos tipos de receptores utilizados: de navegação, topográfico (simples frequência ou L1) ou geodésico (dupla frequência ou L1/L2), conforme a Figura 1.8. O segmento de usuários inclui os receptores, algoritmos e *softwares* utilizados. Os *smartphones* geralmente possuem um receptor de navegação integrado, entretanto, já estão sendo desenvolvidos e comercializados *chips* de dupla frequência (ver a Figura 1.8). Além disso, os satélites mais modernos do sistema GPS já transmitem uma terceira portadora, denominada L5, ou seja, modernamente, deve-se considerar ainda receptores de tripla frequência (L1, L2 e L5). Estas discussões serão vistas em mais detalhes no próximo capítulo.

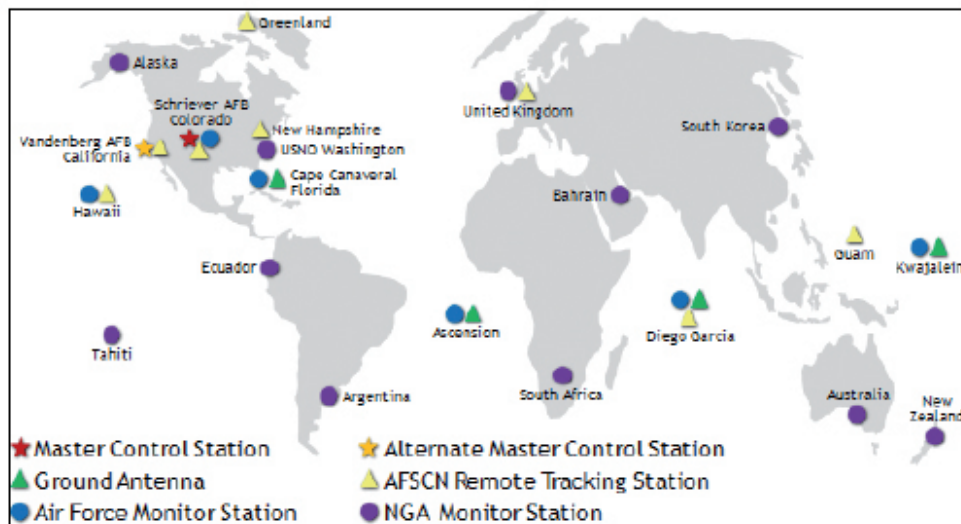


Figura 1.7 – Segmento de controle do sistema GPS.



Figura 1.8 – Diferentes tipos de receptores GPS (de navegação, simples frequência, dupla frequência).

1.2. GLONASS

O GLONASS, desenvolvido pelas Forças de Defesa Aeroespaciais Russas, complementa e fornece uma alternativa para o norte-americano GPS, sendo o único sistema de rádio navegação alternativo em operação com cobertura global e de precisão comparável. O desenvolvimento do GLONASS começou na União Soviética em 1976, os satélites começaram a ser lançados no Espaço em 1982 até que a constelação foi concluída em 1995.

Como os satélites da primeira geração tinham vida útil de três anos cada, para manter o sistema em plena capacidade, dois lançamentos por ano deveriam ser necessários para manter a constelação de 24 satélites. No entanto, no período financeiramente difícil de 1989-1999, o financiamento do programa espacial foi cortado em 80% e, conseqüentemente, a Rússia viu-se incapaz de manter essa taxa de lançamento de dois satélites por ano. Depois que a constelação completa de 24 satélites foi alcançada em Dezembro de 1995, não houve mais lançamentos até Dezembro de 1999. Como resultado, a constelação atingiu o seu ponto mais baixo de apenas seis satélites operacionais em 2001. Como um prelúdio para a desmilitarização, a responsabilidade do programa foi transferida do Ministério da Defesa para os civis da agência espacial russa Roscosmos.

Durante a década de 2000, a restauração do sistema foi uma prioridade do governo russo e o financiamento foi aumentado substancialmente. Em 18 de maio de 2007, todas as restrições de acesso ao sinal foram retiradas, e o sinal, anteriormente militar, com uma precisão de cerca de 10 m, desde então se tornou disponível para usuários civis. Neste ano, os primeiros receptores para uso civil também passaram a ser comercializados. Em 2010, o GLONASS alcançou uma cobertura de 100% do território da Rússia e em outubro de 2011, a constelação orbital de 24 satélites foi restaurada, permitindo uma cobertura global completa (entre seis e onze satélites GLONASS são visíveis em qualquer lugar da Terra em qualquer momento). Os projetos dos satélites GLONASS passaram por várias atualizações, com a última versão sendo denominada GLONASS-K.

Os satélites estão localizados em órbitas de 19.100 km de altitude, com uma inclinação de 64.8 graus e um período orbital de 11 horas e 15 minutos. A órbita mais inclinada dos satélites torna o sistema especialmente adequado para o uso em altas latitudes (norte ou sul), onde a obtenção de sinais GPS pode ser mais problemática. A constelação opera em três planos orbitais com oito satélites igualmente espaçados em cada um, sendo que dos 24 satélites, 18 são necessários para cobrir todo o território da Rússia (Figura 1.9). Para determinar a posição, o receptor deve rastrear o sinal de pelo menos quatro satélites, três dos quais serão utilizados para determinar a localização do usuário e o quarto para determinar o erro do relógio do receptor.

Da mesma forma que o GPS, o sistema GLONASS transmite sinais em duas ondas portadoras, mas cada satélite tem a sua própria frequência e a identificação do satélite é obtida pela frequência do sinal, técnica esta denominada de FDMA (*Frequency Division Multiple Access* – múltiplo acesso pela divisão da frequência). Porém, a partir de 2008, sinais CDMA (*Code Division Multiple Access* – múltiplo acesso pela divisão do código, tal como o sistema GPS) também passaram a ser utilizados (Figura 1.10).

Sobre o sistema de referência, o GLONASS utiliza atualmente o PZ-90.11, que difere do sistema de referência do GPS (WGS-84, última realização G1762, compatível ao ITRF2008) ao nível sub-centimétrico. Desta forma, em termos práticos, pode-se dizer que atualmente os sistemas de referência dos satélites GLONASS e dos satélites GPS são compatíveis, podendo eventuais transformações serem negligenciadas entre ambos, pois o nível de precisão da transformação é equivalente a diferença entre ambos, não sendo necessária a aplicação.

O segmento de controle GLONASS é quase inteiramente localizado dentro do território da ex-União Soviética, com exceção de uma estação em Brasília, Brasil. O centro de controle e padrão de tempo está localizado em Moscou e as estações de telemetria e rastreamento estão localizadas em São Petersburgo, Ternopo, Eniseisk e Komsomolsk-na-Amure.

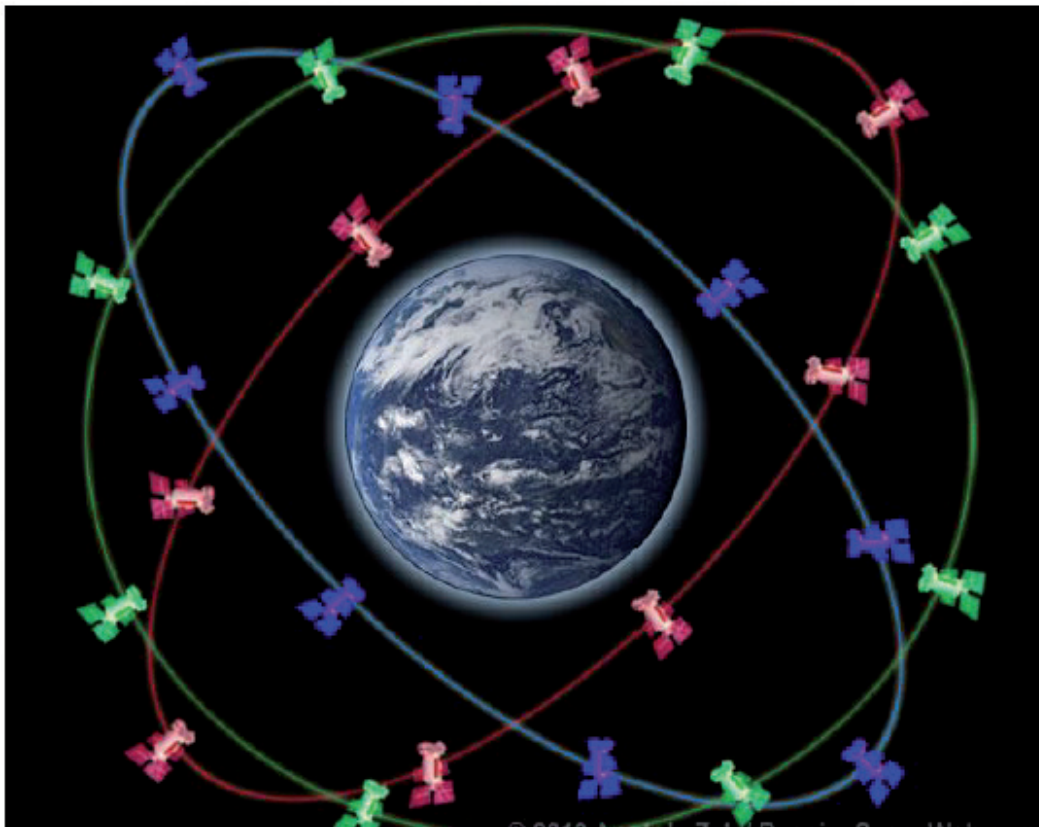


Figura 1.9 – Configuração orbital dos satélites GLONASS.

Grande parte dos receptores GNSS modernos são capazes de usar os sistemas GLONASS e GPS em conjunto, proporcionando melhor cobertura em cânions e áreas urbanas, com menor perda de sinal devido ao fato que mais de 50 satélites estão em órbita. Atualmente, a maior parte dos fabricantes do segmento, como Garmin, Septentrio, Topcon, C-Nav, Javad, Magellan Navigation, Novatel, Leica Geosystems, Hemisphere GPS, Sokkia, Spectra Precision e Trimble produzem receptores que rastreiam sinais GPS e GLONASS, além dos smartphones em geral já possuírem sistema de navegação integrado GPS e GLONASS.

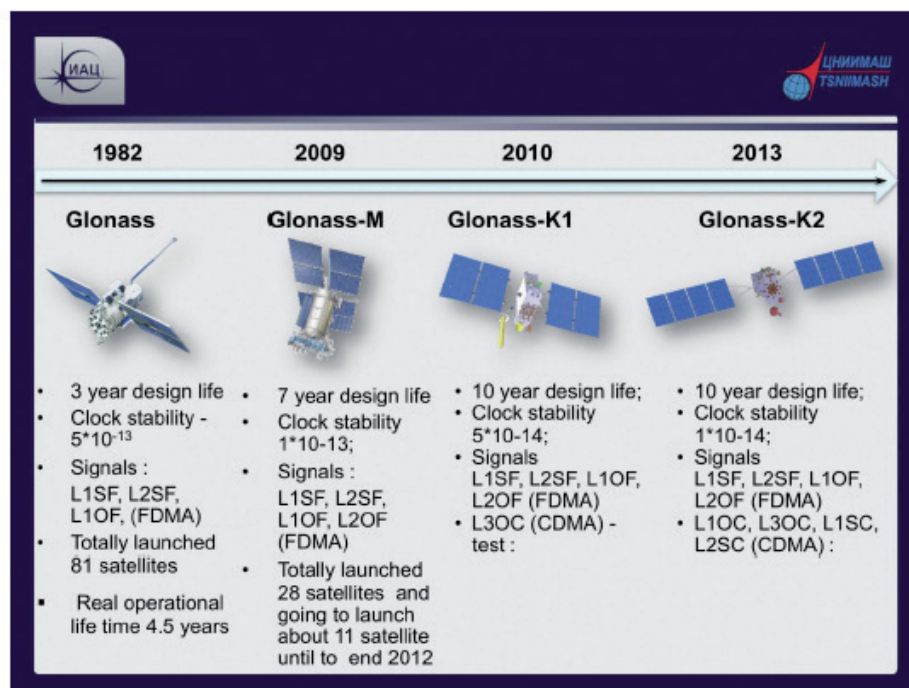


Figura 1.10 – Modernização dos satélites GLONASS.

De acordo com o sistema russo de correção diferencial e monitoramento de dados, a partir de 2010, a precisão de navegação do GLONASS em latitude ou longitude, com nível de confiança de 0,95 (95%), ficou entre 4,46 e 7,38 m, com número médio de satélites visíveis entre 7-8. Em comparação, a precisão de navegação do GPS em latitude ou longitude, com o mesmo nível de confiança, ficou entre 2,00 e 8,76 m, com número médio de satélites visíveis entre 6-11. Utilizando os dois sistemas de navegação ao mesmo tempo, a precisão de navegação em latitude ou longitude ficou entre 2,37 e 4,65 m, com número médio de satélites visíveis entre 14-19 (Figura 1.11). Em latitudes elevadas, a precisão do GLONASS é melhor do que a de GPS, devido à inclinação orbital dos satélites, sendo que o GLONASS se encontra ainda em constante evolução. Atualmente (Março de 2016), o sistema GLONASS possui 29 satélites (24 destes operacionais), sendo que o status atual da constelação GLONASS pode ser obtido no seguinte endereço eletrônico: <http://glonass-iac.ru/en/GLONASS/>.

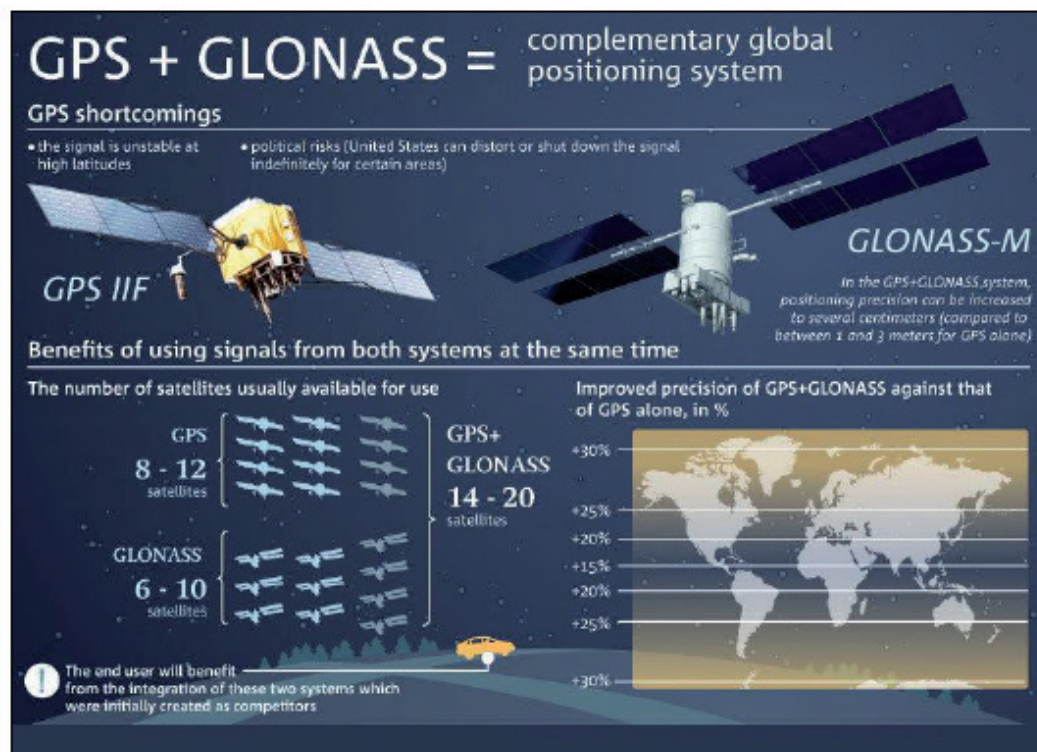


Figura 1.11 – Aumento da precisão do posicionamento GNSS complementando o GPS com o GLONASS.

1.3. GALILEO

Galileo é um sistema GNSS que está sendo desenvolvido pela União Européia (UE) e pela Agência Espacial Europeia (ESA – *European Spatial Agency*). Um dos objetivos do projeto é fornecer um sistema de posicionamento de alta precisão sobre o qual as nações europeias podem confiar, independente do russo GLONASS e do norte-americano GPS, que podem ter a disponibilidade reduzida em tempos de guerra. Em 21 de Outubro de 2011, foram lançados os dois primeiros satélites operacionais para validar o sistema, os dois próximos foram lançados em 12 de Outubro de 2012, tornando possível, com quatro satélites, testar o sistema Galileo. Uma vez que esta fase de validação em órbita for concluída, satélites adicionais serão lançados para atingir a capacidade operacional inicial, em meados desta década. A conclusão integral do sistema Galileo, com 30 satélites (24 operacionais e 6 reservas) está prevista para 2020.

Estão previstos cinco diferentes tipos de serviços pelo sistema Galileo: acesso aberto (gratuito e aberto aos usuários civis); acesso comercial (não gratuito, mas com acesso garantido e contrato de responsabilidade, integrado com redes de comunicação); serviço com segurança de vida (para aplicações críticas em segurança, como aviação civil e navegação marítima, que exigem integridade e disponibilidade); serviço público regulamentado (para aplicações de segurança nacional, como polícia, bombeiros, alfândega e etc., destinadas aos governos); serviço de busca e resgate (si-

nais de socorro serão enviados do receptor do usuário até o centro de resgate, que irá realizar a operação de resgate, ao mesmo tempo, o sistema irá fornecer um sinal para o usuário, informando que a sua situação foi detectada e que a ajuda está a caminho).

O sistema é destinado principalmente para uso civil, ao contrário dos sistemas militarmente mais orientados GPS e GLONASS. Os EUA limitam a intensidade do sinal ou a precisão do GPS, ou desligam completamente o acesso público, de modo que apenas os militares dos EUA e seus aliados seriam capazes de usá-lo em tempos de guerra. O Galileo só estará sujeito ao desligamento para fins militares em circunstâncias extremas. Além disso, depois dos ataques de 11 de setembro de 2001, o Governo dos Estados Unidos escreveu para a União Europeia se opondo ao projeto, argumentando que ele iria acabar com a capacidade dos Estados Unidos de encerrar a navegação por satélites em tempos de operações militares. Em 17 de janeiro de 2002, um porta-voz do projeto afirmou que, como resultado da pressão dos EUA e as dificuldades econômicas: "O Galileo está quase morto". Poucos meses depois, no entanto, membros da União Europeia decidiram que era importante ter um sistema de posicionamento por satélites que os EUA não poderiam facilmente desligar em tempos de conflito político. Em junho de 2004, em um acordo assinado com os Estados Unidos, a União Europeia concordou em mudar para uma modulação conhecida como BOC (1,1) (*Binary Offset Carrier*), permitindo a coexistência do GPS e do Galileo, e no futuro, o uso combinado de ambos os sistemas. A União Europeia também concordou em enfrentar as "preocupações mútuas relacionadas com a proteção de aliados e a segurança nacional dos EUA". Em 2007, os 27 Estados da UE concordaram, por unanimidade, avançar no projeto, e outros países, como China, Israel, Ucrânia, Marrocos, Coreia do Sul e Noruega, também aderiram ao projeto.

O sistema completo irá contar com 30 satélites (incluindo 6 reservas), com altitude orbital de 23.222 km, distribuídos em três planos com 56° de inclinação cada, período orbital de 14h4m, e com vida útil dos satélites de mais de 12 anos (Figura 1.12). Os sinais do Galileo serão transmitidos em três bandas de frequências (E5, E6 e L1), usando quatro portadoras (E5A, E5B, E6 e E1), sendo que a E5A e E1 compartilham as mesmas frequências da L5 e L1 do GPS, respectivamente, o que visa facilitar a integração entre os dois sistemas. Atualmente (Março de 2016), o sistema Galileo possui três satélites operacionais, um com serviço interrompido e oito em fase de desenvolvimento e testes, sendo que o status atual da constelação Galileo pode ser obtida no seguinte endereço eletrônico: <http://www.gsc-europa.eu/system-status/Constellation-Information>.

O segmento de controle do Galileo consiste na estação de controle localizada em Oberpfaffenhofen (na Bavária, Alemanha), um centro de missão localizado em Fucino (Itália), e cinco estações monitoras localizadas em Kiruna (norte da Suécia), Kourou (Guiana Francesa), Noumea (ilha de Nova Caledônia na Oceania), Sainte-Marie (ilha de Réunion, ao lado de Madagascar) e Redu (Bélgica). O sistema de referência do sistema Galileo é o *Galileo Terrestrial Reference Frame* (GTR-F14v01), compatível ao nível do milímetro ao ITRF2008, e, portanto, ao WGS-84 G1762 (GPS) e ao PZ-90.11 (GLONASS).

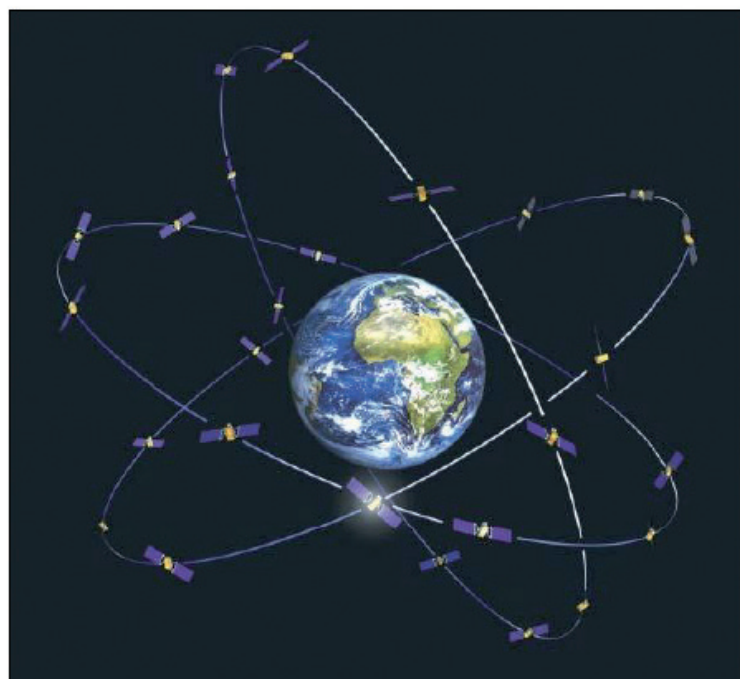


Figura 1.12 – Configuração orbital prevista para os satélites Galileo.

1.4. BEIDOU

O *Beidou Navigation Satellite* é um sistema chinês de navegação por satélite. O sistema de navegação Beidou é nomeado em referência a constelação Ursa Maior, que é conhecida em chinês como Běidǒu. O nome significa literalmente “Urso do Norte”, o nome dado pelos antigos astrônomos chineses para as sete estrelas mais brilhantes da constelação da Ursa Maior.

O Beidou consiste de duas constelações de satélites separados, sendo um sistema de teste limitado, em funcionamento desde 2000, e um sistema de navegação global em grande escala que atualmente está em construção. O primeiro sistema Beidou, chamado oficialmente de *Satellite Navigation System Experimental Beidou* e também conhecido como Beidou-1, consiste em três satélites e oferece cobertura e aplicações limitadas, oferecendo serviços de navegação, principalmente para clientes na China e regiões vizinhas. A segunda geração do sistema, chamada oficialmente de sistema de navegação por satélite Beidou (BDS) e também conhecida como *Compass* (bússola) ou Beidou-2, será um sistema global de navegação por satélite com 35 satélites, previsto para começar a servir de forma global após a sua conclusão em 2020. O Beidou 2 tornou-se operacional na China em dezembro de 2011, com dez satélites em órbita, e começou a oferecer serviços aos clientes na região da Ásia e do Pacífico em dezembro de 2012.

O Beidou-1 foi um sistema experimental de navegação regional, constituído por quatro satélites (três satélites de trabalho e um satélite de *backup*), e, ao contrário dos sistemas GPS, GLONASS e Galileo, que utilizam satélites em órbita média inclinada, o Beidou-1 utiliza satélites em órbita geoestacionária. Isto significa que o sistema não exige uma grande constelação de satélites, mas também limita a cobertura das áreas em terra, apenas onde os satélites estão visíveis. A área que podia ser atendida situa-se entre as longitudes de 70° leste a 140° leste e entre as latitude de 5° norte a 55° norte (Figura 1.13). A frequência do sistema era 2491,75 MHz. O primeiro satélite (Beidou-1A), foi lançado em Outubro de 2000, o segundo satélite (Beidou-1B) foi lançado em dezembro de 2000, e o último satélite operacional da constelação (Beidou-1C) foi lançado em Maio de 2003. O sistema experimental Beidou-1 foi encerrado no final de 2012.

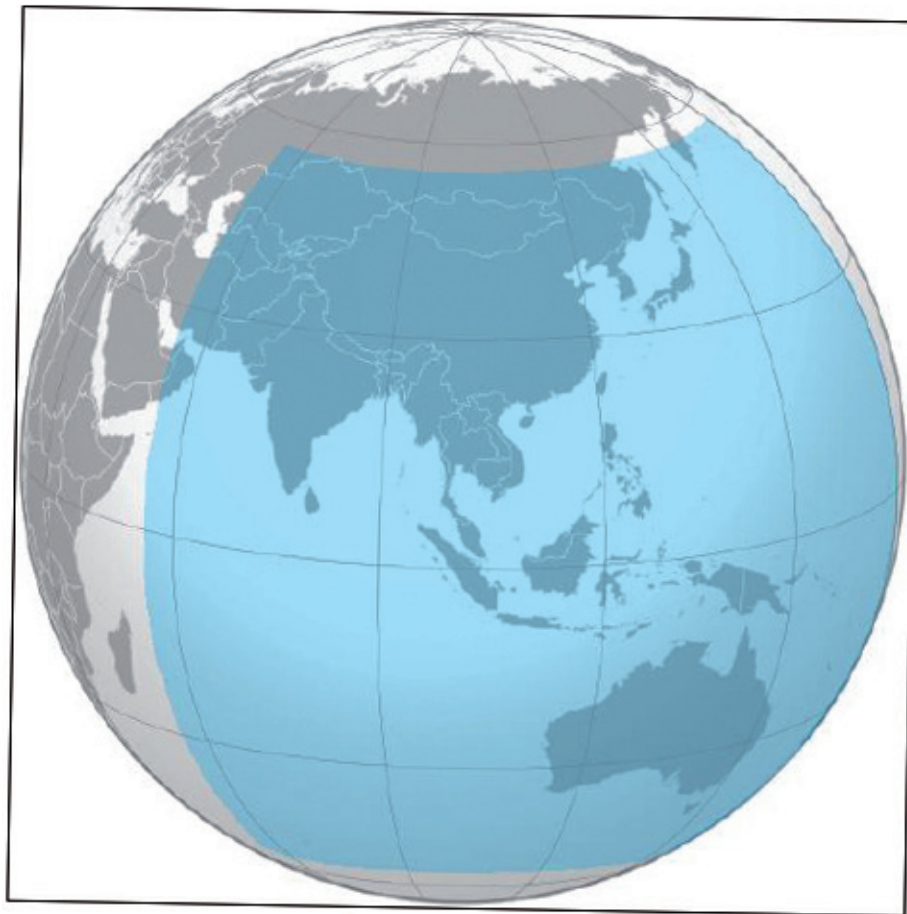


Figura 1.13 – Área de cobertura do sistema Beidou-1.

O Beidou-2, também conhecido como *Compass*, não é uma extensão do Beidou-1, mas um novo sistema que terá uma constelação de trinta e cinco satélites, que incluem cinco satélites em órbita geoestacionária para compatibilidade com o Beidou-1, e trinta satélites não-geoestacionários (vinte e sete em órbita média e três em órbita inclinada geossíncrona), oferecendo uma cobertura completa do globo (Figura 1.14). Existirão dois tipos de serviço, um gratuito para os civis e outro licenciado para o governo chinês e militares. O serviço civil livre tem uma precisão de localização de 10 metros, enquanto o serviço militar tem uma precisão de localização de 10 centímetros, pode ser usado para a comunicação, e fornecerá informação sobre o estado do sistema para o utilizador. Até o momento, o serviço militar foi concedido apenas ao Exército Popular de Libertação da China e aos militares do Paquistão.

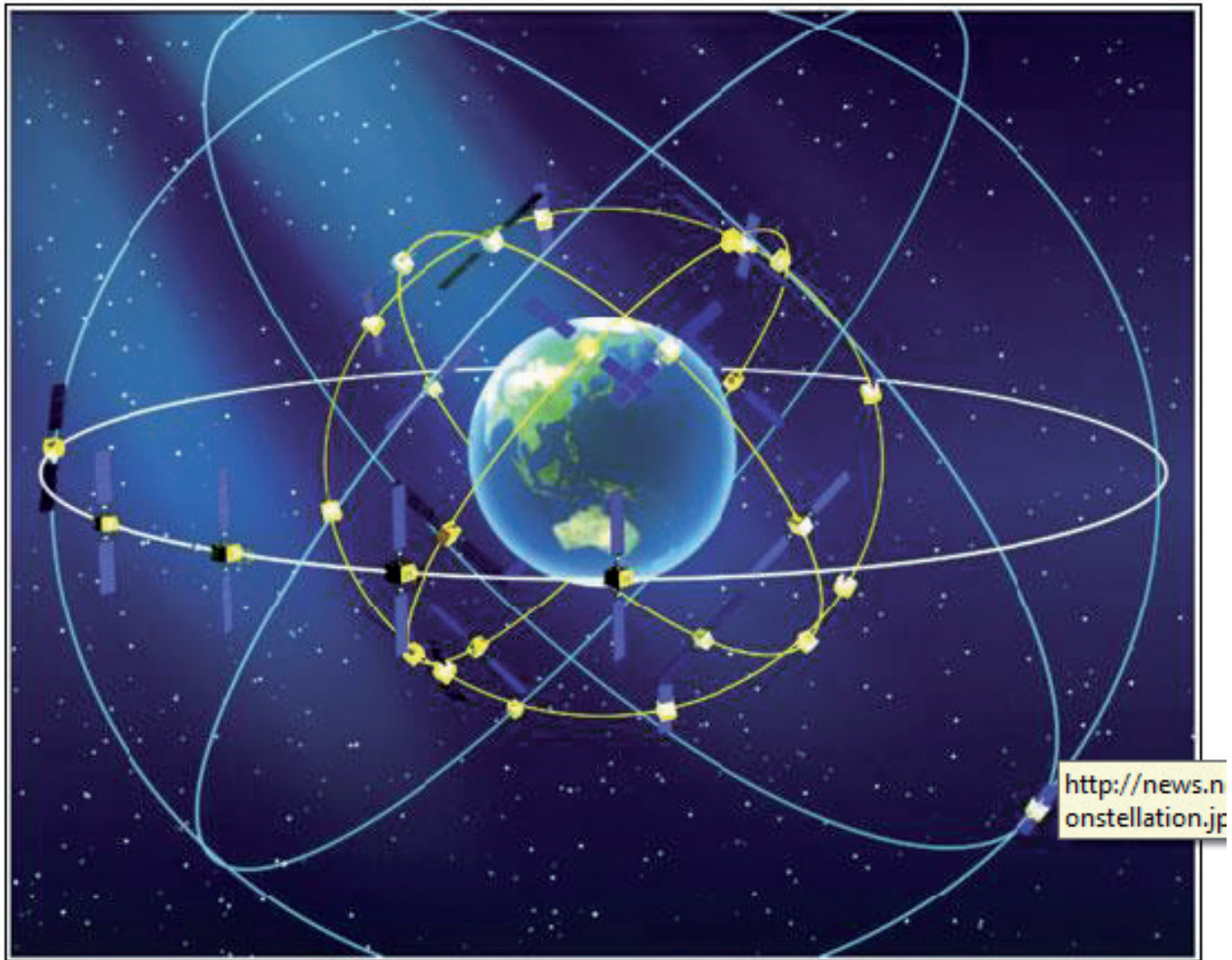


Figura 1.14 – Configuração orbital prevista para o sistema Beidou-2.

Em 30 de Setembro de 2015, foi lançado o primeiro satélite da terceira geração do Beidou. Atualmente (Março de 2016), o sistema Beidou possui quatorze satélites operacionais (cinco em órbita geoestacionária, quatro em órbita média e cinco em órbita inclinada geossíncrona), com mais cinco em fase de desenvolvimento e testes (três de órbita média e dois de órbita inclinada geossíncrona, destes, quatro fazem parte da terceira geração do sistema). O status atual da constelação Beidou pode ser obtido no seguinte endereço eletrônico: http://mgex.igs.org/IGS_MGEX_Status_BDS.html.

Atualmente, o sistema de referência do Beidou é o *Compass Geodetic System 2012* (CGS 2012), que é compatível ao ITRF2008, e, portanto, ao WGS-84 G1762 (GPS), ao PZ-90.11 (GLONASS) e ao GTRF14v01 (Galileo). A Figura 1.15 apresenta um resumo dos quatro principais sistemas GNSS atualmente disponíveis.

Global Navigation Satellite System				Symmetricom	
GNSS	GPS	GLONASS	GALILEO	COMPASS (Beidou2)	
Country	 	 	 		
Satellites + Spare (Plan)	27 + 3 (1993)	21 + 3 (2012)	26 + 4 (201x)	30 + 5 GEO (2015)	
Satellites in Constellation	31 (2009)	19 (2009) 24 (2012) 3Y	2 (2009) 4 (2011) 2Y 18 (2013) 4Y	2(2009) 12 (2011) 2Y 30 (2015) 6Y	
Orbital height	20180 km	19100 km	23222 km	21500 km	
Orbital period	11:58 h	11:15 h	14.05 h	12:35 h	
System Control	Military	Military	Civil	Military	
Timing Services	Yes	Yes	Yes	Yes	
Clocks	Cs, Rb	Cs	PHM, Rb	Rb	
TimeScale	TAI-19	UTC-3 hours	TAI		
Time Offset transmission	GGTO GPS/Galileo Time Offset		GGTO GPS/Galileo Time Offset		
Open service / 95%	100 ns	100 ns	30ns	50ns	
Open service / 95%	28m		35m	50m	

RNSS Regional Navigation Satellite Systems: QZSS (Japan), IRNSS (India) and Beidou1 (China)

PAGE 8

Figura 1.15 – Quadro comparativo entre os principais sistemas GNSS atualmente disponíveis.

1.5. IRNSS

O IRNSS (*Indian Regional Navigation Satellite System* – sistema regional indiano de navegação por satélite) está sendo desenvolvido pela Organização Indiana de Pesquisa Espacial (ISRO – *Indian Spatial Research Organization*). Tal como o Beidou-1, o IRNSS não é um sistema global de navegação por satélite (GNSS), mas sim, um sistema regional de navegação por satélite – *Regional Navigation Satellite System* (RNSS). A necessidade de tal sistema de navegação também é conduzida pelo fato do acesso ao GPS e GLONASS não ser garantido em tempos de conflitos. Os sinais IRNSS serão compostos de um serviço de posicionamento padrão, aberto para civis, e um serviço de precisão, para usuários autorizados ou militares. Ambos serão realizados em duas frequências, na banda L5 (1176,45 MHz) e na banda S (2.492,08 MHz). Três dos satélites da constelação serão colocados em órbita geoestacionária, com um arranjo tal que todos os sete satélites terão visibilidade permanente com as estações de controle indianas (Figura 1.17).

O sistema foi projetado para fornecer uma precisão posicional melhor do que 10 metros em toda a Índia e melhor do que 20 metros no Oceano Índico, bem como na região que se estende cerca de 1.500 km ao redor de toda a Índia (Figura 1.18). O primeiro dos sete satélites da constelação IRNSS foi lançado em 1 de julho de 2013 a partir do Centro Espacial Satish Dhawan em Sriharikota, e atualmente, o IRNSS possui quatro satélites operacionais (um geoestacionário e quatro em órbita inclinada geossíncrona), e mais dois em fase de desenvolvimento e testes (um geoestacionário e um em órbita inclinada geossíncrona).

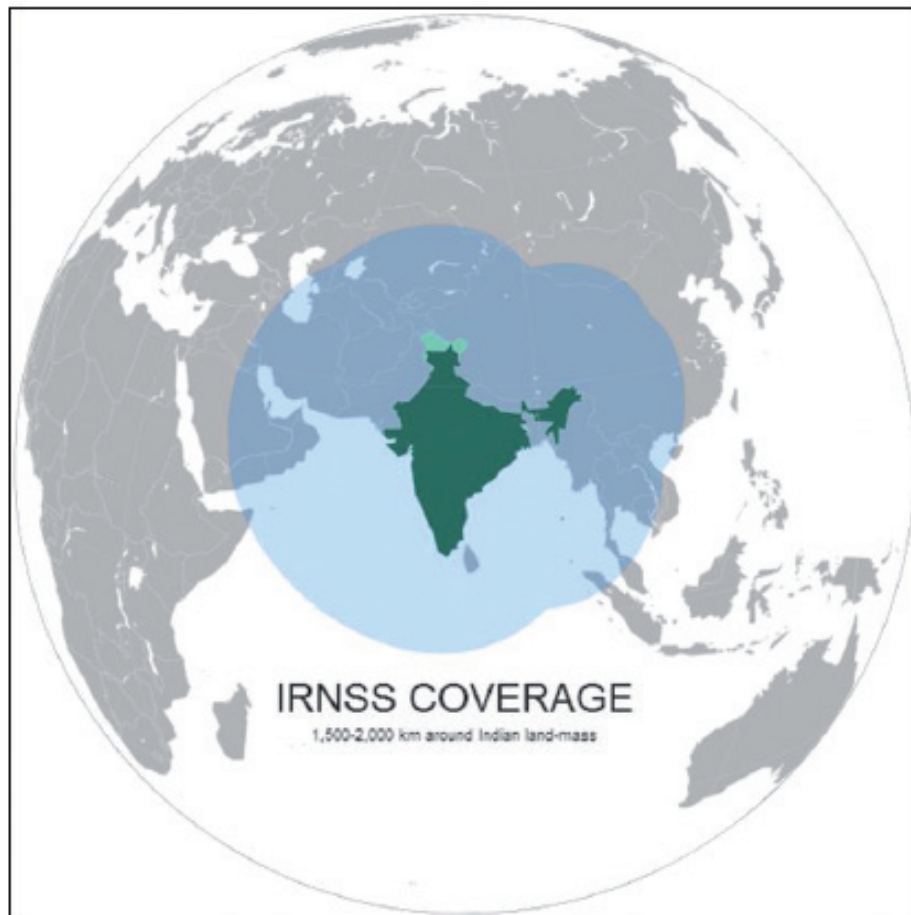


Figura 1.17 – Área de cobertura do sistema IRNSS.

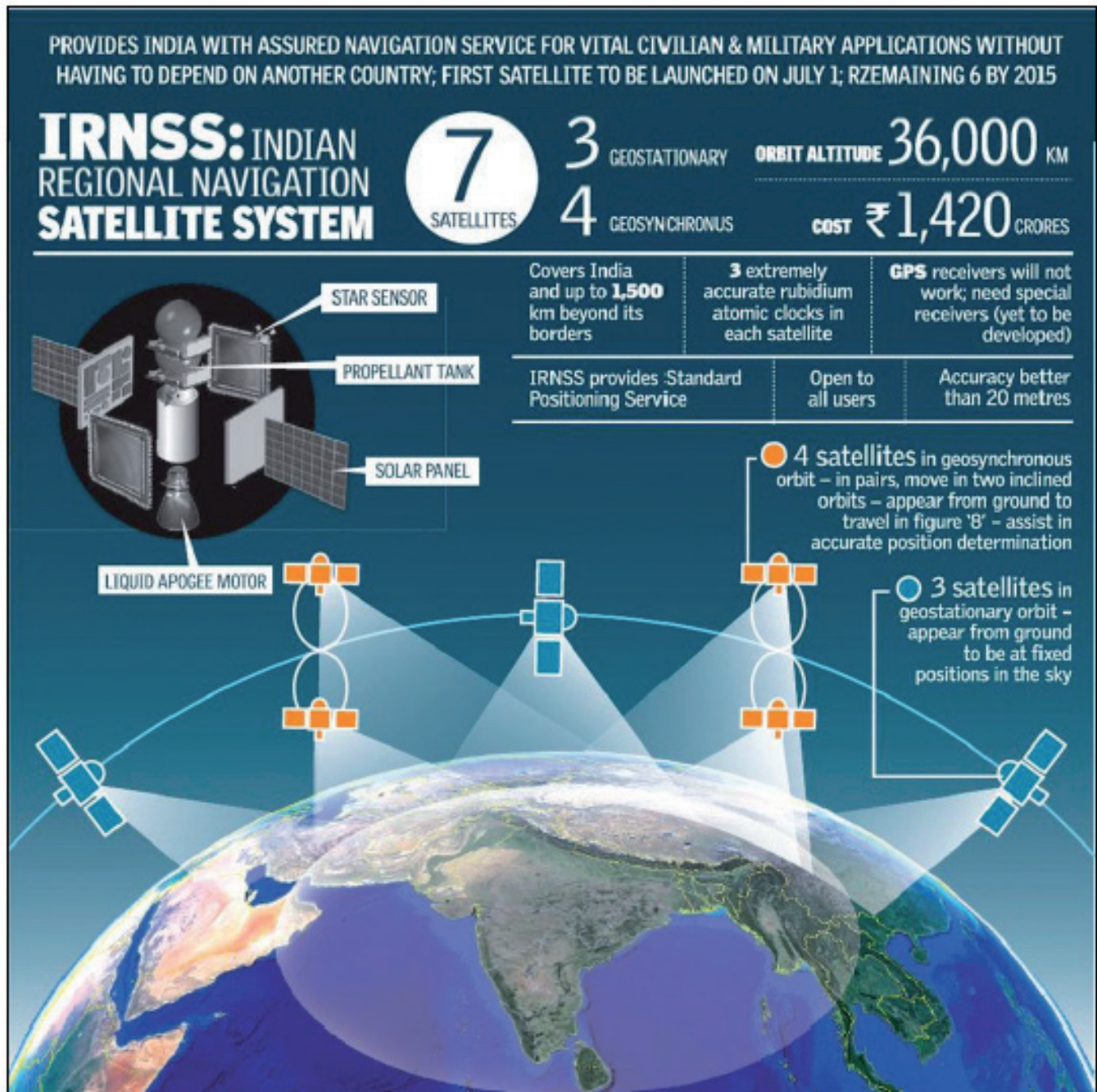


Figura 1.18 – Principais características do sistema IRNSS.

A Tabela 1.1 apresenta um comparativo entre os sistemas GNSS e o IRNSS, sendo que o status atual do IRNN pode ser obtido no seguinte endereço eletrônico: http://mgex.igs.org/IGS_MGEX_Status_IRNS.html.

Tabela 1.1 – Comparativo entre os sistemas GNSS e o IRNSS.

SISTEMA	GPS	GLONASS	Compass	Galileo	IRNSS
PAÍS	Estados Unidos	Rússia	China	União Europeia	Índia
CODIFICAÇÃO	CDMA	FDMA/CDMA	CDMA	CDMA	CDMA
ALTURA ORBITAL	20,180 km	19,130 km	21,150 km	23,220 km	36,000 km
PERÍODO	11 h 58 m	11 h 16 m	12 h 38 m	14 h de 5 m	(Geoestacionário)
NÚMERO DE SATÉLITES	Pelo menos 24 (atualmente 31 operacionais)	24 (atualmente 24 operacionais)	5 satélites de órbita geoestacionária, 27 em órbita média (quatro operacionais) e 3 em órbita inclinada geossíncrona (cinco operacionais)	27 mais 3 reservas (atualmente 3 operacionais)	7 satélites, 3 em órbita geoestacionária (atualmente 1 operacional) e 4 em órbita inclinada geossíncrona (atualmente 4 operacionais)
FREQUÊNCIA	1,57542 GHz (L1), 1,2276 GHz (L2), 1,17645 GHz (L5)	Cerca de 1,602 GHz (SP) Cerca de 1,246 GHz (SP)	1,561098 GHz (B1) 1,589742 GHz (B1-2) 1,20714 GHz (B2) 1,26852 GHz (B3)	1,164-1,215 GHz (E5a e E5b) 1,260-1,300 GHz (E6) 1,559-1,592 GHz (E2-L1-E11)	1,17645 GHz (L5), 2,49208 (S)
ESTADO	Operacional	Operacional, com CDMA na preparação	14 satélites operacionais, restando 23 de órbita média	Em desenvolvimento	5 satélites operacionais, restando 2 de órbita geoestacionária

1.6. QZSS

O QZSS (*Quasi-Zenith Satellite System* – sistema de satélite quase zenital), é uma proposta de três satélites regionais para um sistema aumentado baseado em satélites para o GPS, a ser utilizado no Japão. O primeiro satélite (Michibiki) foi lançado em 11 de setembro de 2010. Em março de 2013, O Japão anunciou a expansão do sistema de três satélites para quatro. O contrato com a Mitsubishi Electric para a construção de três satélites está previsto para ser lançado antes do final de 2017. No que diz respeito ao serviço de posicionamento, o QZSS só pode fornecer uma precisão limitada e atualmente não é recomendado em suas especificações para trabalhar em modo único, isto é, como um RNSS, mas sim, como uma extensão (aumento) do serviço GPS.

O QZSS será formado por três (ou quatro) satélites, com uma inclinação de 120° entre eles, em órbitas geossíncronas altamente inclinadas (Figura 1.19). Devido a esta disposição, não são geoestacionários, e, em vez disso, suas projeções na Terra são figuras em forma de oito com padrão assimétrico (analemas), garantindo que pelo menos um esteja visível sobre o Japão, a uma inclinação de no mínimo 60°, em qualquer instante (Figura 1.20). O objetivo principal do QZSS é aumentar a disponibilidade do GPS em diversos “cânions urbanos” do Japão, onde apenas os satélites com ângulo de elevação muito alto (“quase zenital”) podem ser vistos, enquanto a função secundária é melhorar o posicionamento e a confiabilidade. Os satélites QZSS transmitem sinais compatíveis com os do GPS (L1, L2 e L5).

O sistema de referência do QZSS é o *Japanese Satellite Navigation Geodetic System* (JSG2010), que é compatível ao ITRF2008, e, portanto, ao WGS-84 G1762 (GPS), ao PZ-90.11 (GLONASS), ao GTRF14v01 (Galileo) e ao CGS 2012 (Beidou). Atualmente (Março de 2016), apenas um satélite está operacional e nenhum satélite encontra-se em fase de testes, sendo que o status atual da constelação QZSS (e dos sistemas GNSS e RNSS) pode ser obtido no seguinte endereço eletrônico: <http://qzss.go.jp/en/technical/satellites/index.html#IRNSS>.

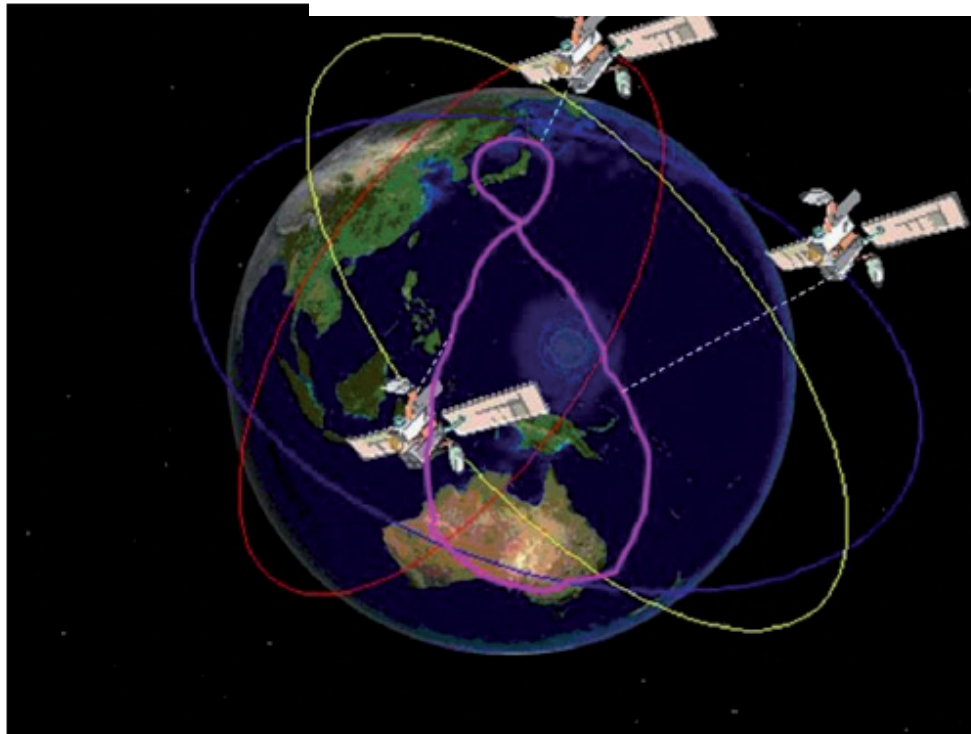


Figura 1.19 – Configuração orbital prevista do sistema QZSS.

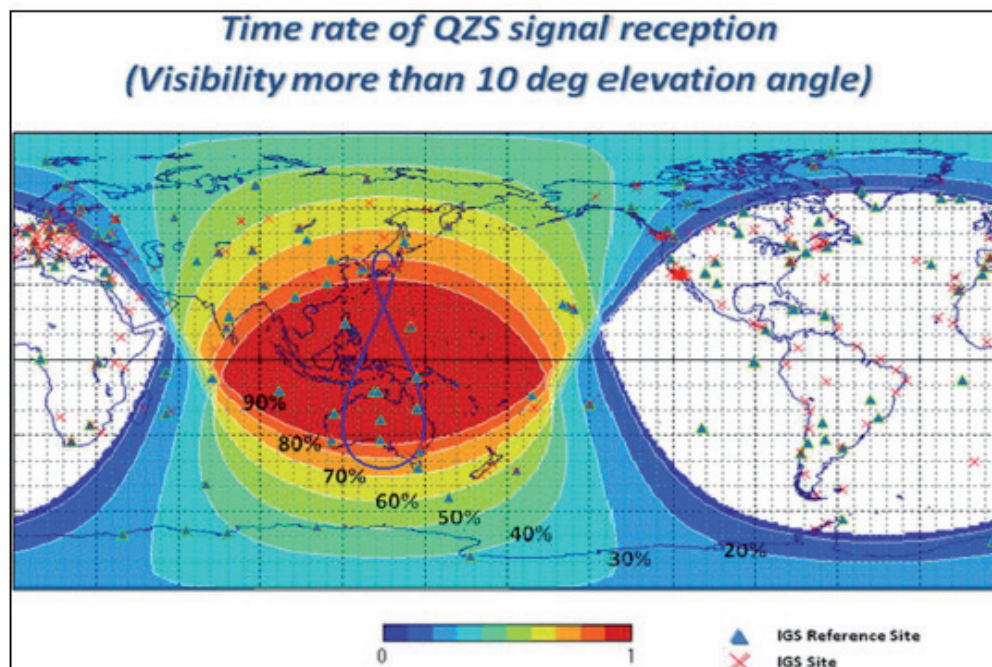


Figura 1.20 – Taxa de disponibilidade de sinais QZSS para ângulos de elevação acima de 10°.

A Figura 1.21 apresenta as faixas de frequência dos sinais dos sistemas GNSS, do IRNSS e do QZSS.

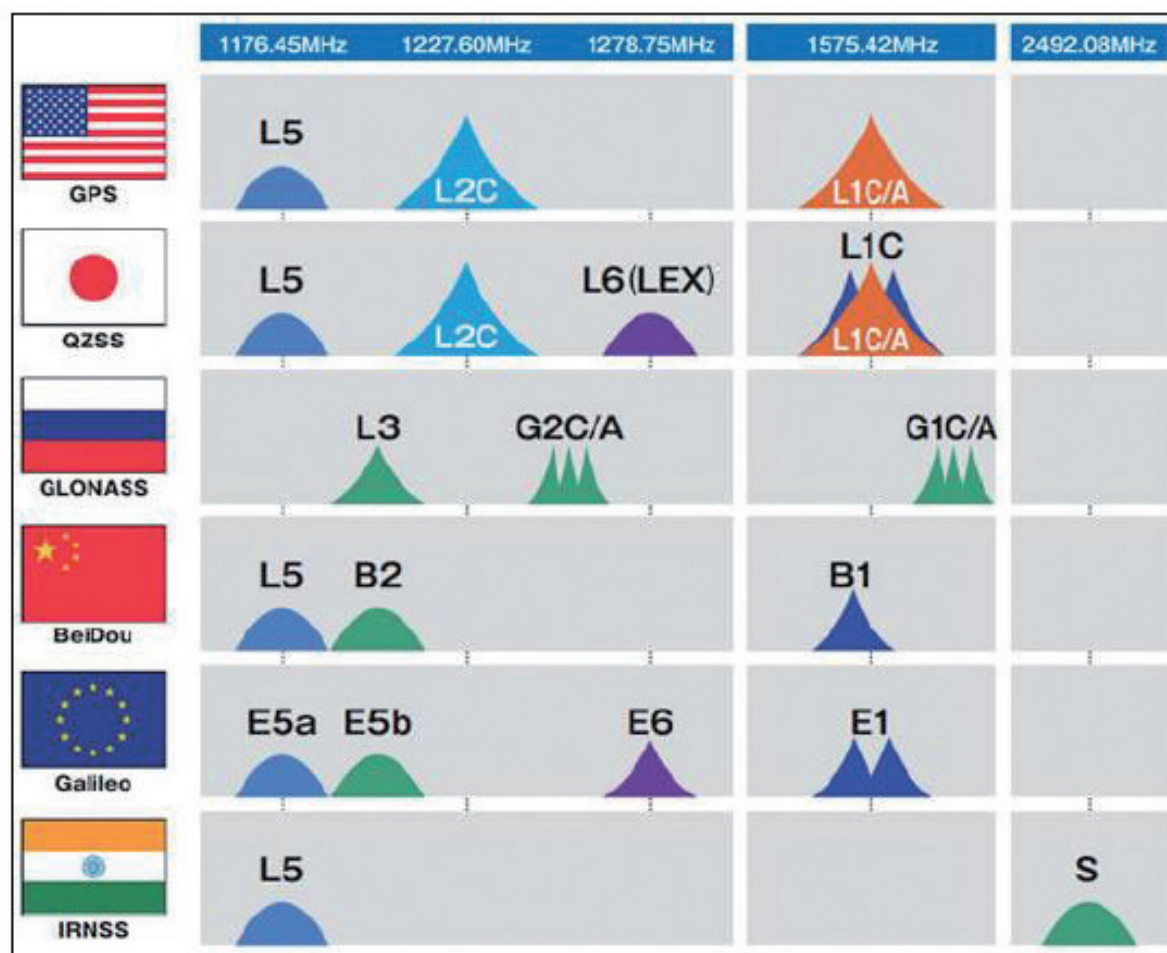


Figura 1.21 – Faixas de frequência (em MHz) dos sinais dos sistemas GNSS, do IRNSS e do QZSS.

1.7. AUMENTO GNSS

Aumento de um sistema GNSS é um método de aprimorar os atributos deste sistema de navegação, tais como precisão, confiabilidade e disponibilidade, por meio da integração de informações externas aos processos de cálculo. Atualmente existem muitos sistemas GNSS aumentados e estes geralmente são denominados ou descritos com base em como o sensor GNSS recebe a informação externa. Alguns sistemas transmitem informações adicionais sobre fontes de erro, como o erro do relógio, erro orbital ou atraso ionosférico, outros fornecem medições diretas de o quanto determinado sinal GNSS está defasado, enquanto um terceiro grupo fornece ainda informações adicionais a serem integradas no processo de cálculo.

Um SBAS (*Satellite-Based Augmentation System* – sistema aumentado baseado em satélites) é um sistema que apoia uma área ou região por meio da transmissão de mensagens de satélite adicionais. Tais sistemas são comumente compostos de várias estações terrestres, localizadas em pontos determinados com alta acurácia. As estações terrestres realizam medições dos sinais dos satélites GNSS ou de fatores ambientais que podem ter impacto no sinal recebido pelos receptores GNSS. Utilizando estas medições, mensagens de informação são geradas e enviadas para um ou mais satélites de transmissão para os usuários finais.

Atualmente existem diversos SBAS (Figura 1.22), como por exemplo, *Wide Area Augmentation System* (WAAS), mantido pela Administração Federal de Aviação dos Estados Unidos, *European Geostationary Navigation Overlay Service* (EGNOS), mantido pela Agência GNSS Europeia, *Multi-functional Satellite Augmentation System* (MSAS) e *Quasi-*

-Zenith Satellite System (QZSS) mantidos pelo Japão, GPS Aided Geo Augmented Navigation (GAGAN) system, mantido pela Índia, GLONASS System for Differential Correction and Monitoring (SDCM), mantido pela Rússia, *Satellite Navigation Augmentation System* (SNAS), mantido pela China, *Wide Area GPS Enhancement* (WAGE), mantido pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos para usuários militares e autorizados, o GPS-C, mantido pelo Sistema de Controle Ativo Canadense, e os comerciais *StarFire navigation system*, mantido pelo grupo John Deere, e *OmniSTAR system*, mantido pelo grupo Fugro.

Estes SBAS são utilizados tanto para navegação área quanto terrestre e fornecem posicionamento planimétrico e altimétrico em tempo real com precisão métrica ou decimétrica (Figura 1.23).

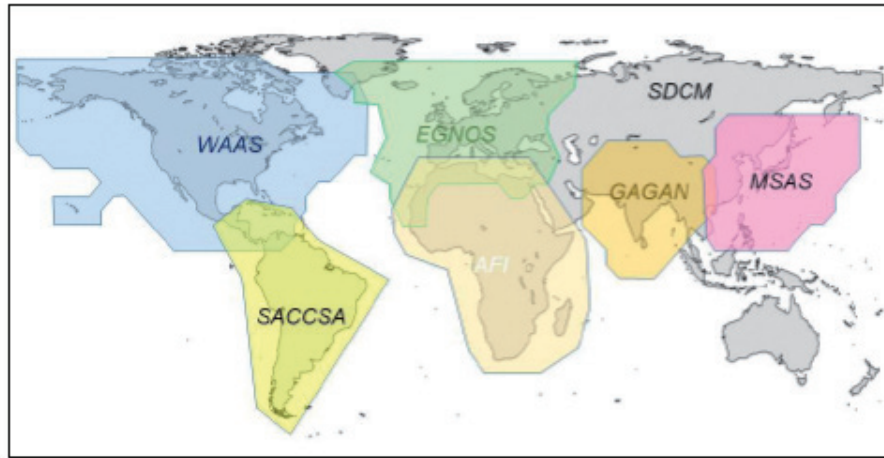


Figura 1.22 – Áreas de serviço de alguns dos principais SBAs a nível mundial.

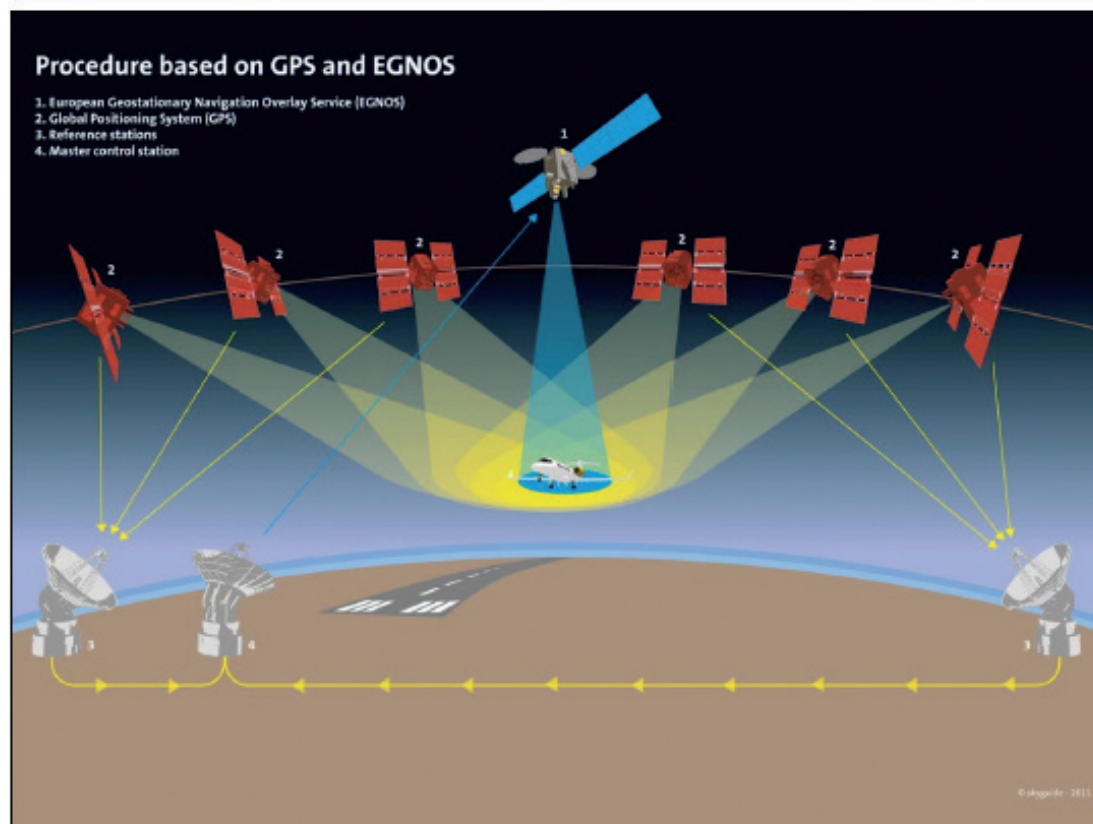


Figura 1.23 – Princípio de funcionamento do sistema EGNOS para navegação aérea.

Adicionalmente, existe ainda o GBAS (*Ground-Based Augmentation System* – sistema aumentado baseado em solo), que consiste em um sistema aumentado por meio da utilização de mensagens terrestres de rádio. Tal como os SBAS, os GBAS são comumente compostos de uma ou mais estações terrestres localizadas em pontos determinados com alta acurácia, que realizam medidas relativas aos sistemas GNSS, e um ou mais transmissores de rádio, que transmitem a informação diretamente para o usuário final, de baixo para cima, evitando assim as limitações associadas com os satélites geoestacionários em altas latitudes (Figura 1.24).

Geralmente, uma estação GBAS apoia receptores GNSS dentro de um raio de até 45 km, transmitindo na banda de frequência muito alta (VHF – *very high frequency*). Quanto menor for a distância entre a estação terrestre que calcula as correções diferenciais em relação aos dados de entrada, maior é a precisão esperada. Existem requisitos de segurança mais rigorosos sobre os sistemas GBAS em relação aos sistemas SBAS, pois os sistemas GBAS destinam-se principalmente para a fase de pouso de aeronaves, onde a precisão em tempo real e o controle de integridade do sinal é crucial, especialmente quando as condições de tempo se deterioram e não há nenhuma visibilidade (condições CAT-I / II / III), para as quais os sistemas SBAS não são adequados.

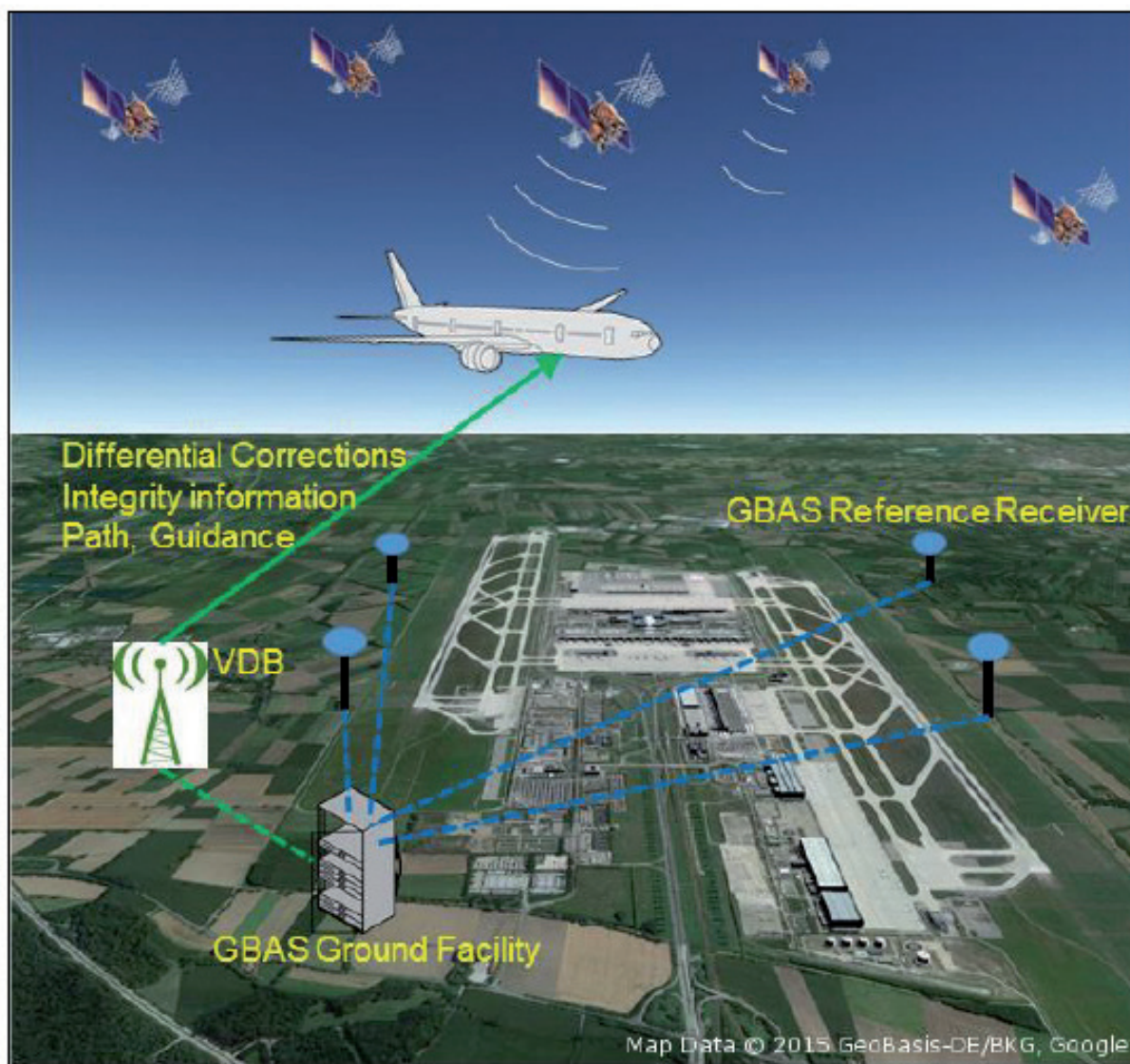


Figura 1.24 – Estrutura de funcionamento de um sistema GBAS.

Atualmente existem vários serviços de GBAS disponíveis, como por exemplo, *International Civil Aviation Organization Ground-Based Augmentation System*, originalmente denominado *Local Area Augmentation System* (LAAS), o *US Nationwide Differential GPS System* (NDGPS) nos EUA, o *SAPOS* (*SATellite POsitioning Service*) na Alemanha e o *Ordnance Survey* no Reino Unido.

1.8. IPS

Recentemente, devido a limitação dos sistemas GNSS em espaços internos (obstrução e reflexão dos sinais dos satélites pelas construções), foram desenvolvidos sistemas de posicionamento de interiores (IPS – *Indoor Positioning System*). Um IPS é um sistema de localização de objetos ou pessoas dentro de um edifício por meio de ondas de rádio, campos magnéticos, sinais acústicos, ou outras informações sensoriais coletadas por dispositivos móveis (Figura 1.25). Existem vários sistemas comerciais no mercado, empregando as mais diversas tecnologias, como medição de distâncias aos nódulos de ancoragem nas proximidades (nós com posições conhecidas, como por exemplo, pontos de acesso Wi-Fi), posicionamento magnético, tecnologia *bluetooth* ou *dead reckoning*. O objetivo é fornecer a localização ativa ou o contexto ambiental para dispositivos móveis. Sistemas IPS podem fazer uso de vários tipos de ondas, como rádio, ópticas ou acústicas.

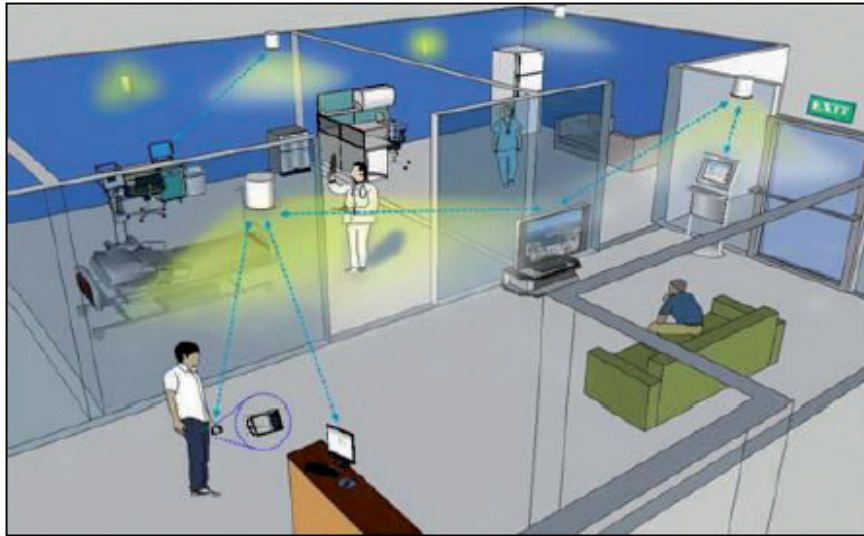


Figura 1.25 – Conceito de um sistema IPS.

Projetos de sistemas IPS devem considerar que pelo menos três medições independentes são necessárias para determinar inequivocamente a localização de um dispositivo, devendo, para isto, incluir informações de outros sistemas para lidar com a ambiguidade da realidade física e possibilitar compensações de erro. Dentre algumas das aplicações, pode-se citar visitas guiadas a museus, localização em aeroportos, estações de trem, metrô e ônibus, *shopping centers*, escolas, hospitais, hotéis, vagas em estacionamentos internos e etc.

Sistemas IPS estão sendo utilizados para compreender rotinas e hábitos de clientes e, desta forma, rentabilizar o espaço de instalações de lojas, ou ainda, para acompanhar a localização dos produtos dentro de uma loja, para analisar quando um item é selecionado e transportado ao redor da loja ou trazido para a sala de montagem, e se este é colocado de volta na prateleira ou comprado, visando obter uma melhor compreensão de como o consumidor está interagindo com o produto.

2. Observáveis GNSS e Órbitas dos Satélites

Sistemas de posicionamento GNSS são sistemas de rádio navegação, isto é, utilizam ondas de rádio (ondas eletromagnéticas). Uma onda eletromagnética é uma onda que se propaga na velocidade da luz ($c = 299.792.458$ metros por segundo no vácuo), transportando um campo elétrico e um campo magnético, perpendiculares entre si e ao sentido de propagação da onda (Figura 2.1). Ondas eletromagnéticas não necessitam de um meio material para se propagar, ao contrário de ondas mecânicas, como por exemplo, as ondas sonoras.

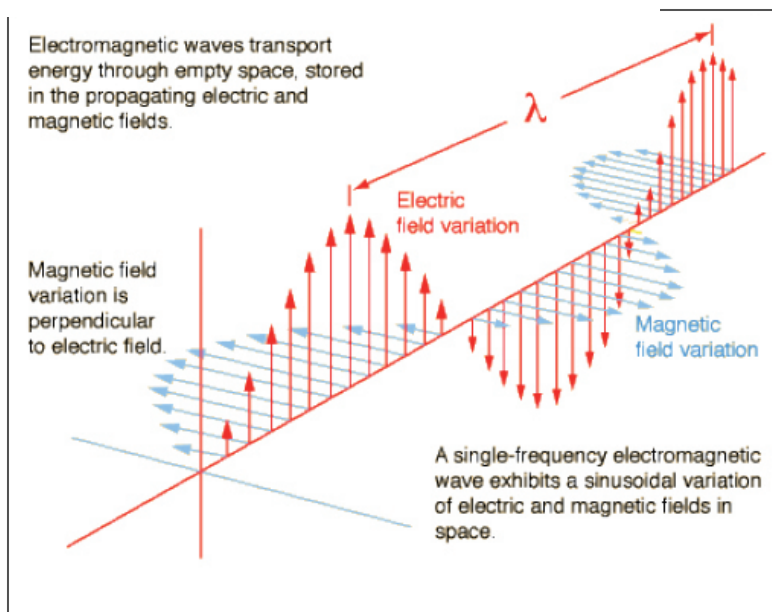


Figura 2.1 – Conceito de onda eletromagnética.

Ondas eletromagnéticas como as ondas de rádio obedecem a seguinte relação:

$$c = \lambda f$$

onde c é a velocidade da onda (velocidade da luz), λ é o comprimento de onda (distância para a onda apresentar o mesmo valor repetitivo em seu padrão, ver a Figura 2.1), e f é a frequência da onda, ou seja, o inverso do seu período (tempo necessário para a onda apresentar o mesmo valor repetitivo em seu padrão). O comprimento de onda é medido em unidade linear, por exemplo, metros, e a frequência é medida em s^{-1} ou Hz (hertz).

No caso das ondas eletromagnéticas, como todas se propagam na velocidade da luz, variando o comprimento de onda, e, conseqüentemente, a frequência, resulta no chamado espectro eletromagnético, dividido em diferentes regiões em função da frequência (ou comprimento de onda), como radiação gama, raios X, radiação ultravioleta, luz visível, infravermelho, micro-ondas e ondas de rádio (Figura 2.2).

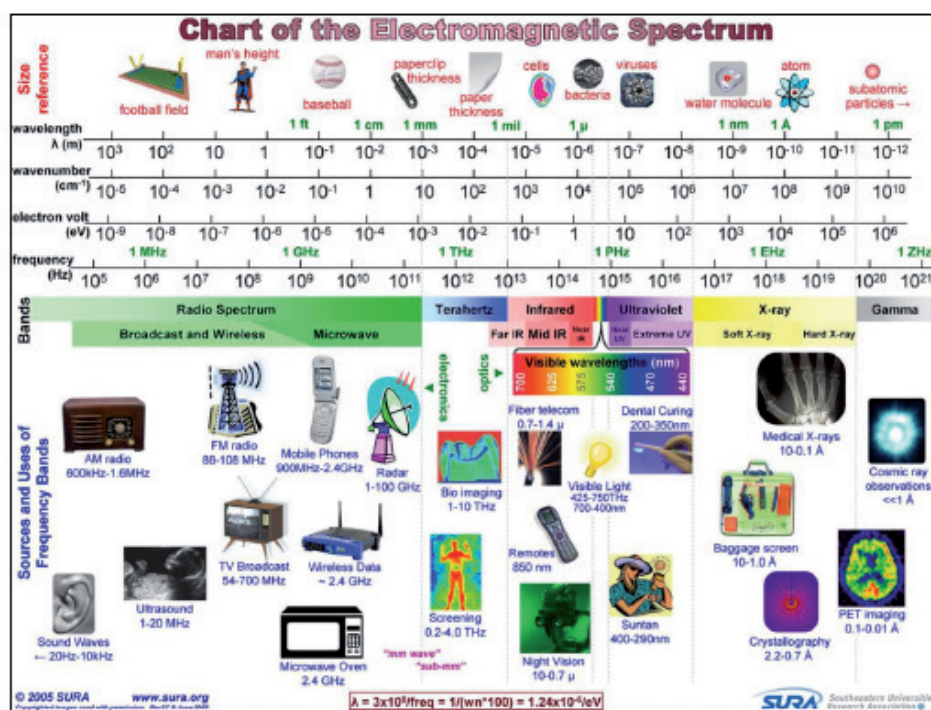


Figura 2.2 – Espectro eletromagnético.

As ondas de rádio compreendem uma faixa cujos comprimentos de onda variam entre 100 micrometros até 100 quilômetros, ou, analogamente, entre 3 terahertz (THz) até 3 kilohertz (KHz). Além dos satélites GNSS, outros satélites transmitem informações por meio de ondas de rádio, como os satélites de telecomunicações de rádio, televisão, internet, telefonia e etc.

No caso do GPS, cada satélite transmite das ondas portadoras na banda L do espectro eletromagnético (ondas de rádio), denominadas de L1 e L2. Elas são geradas por meio da multiplicação eletrônica da frequência fundamental (f_0) de 10,23 MHz que é produzida nos satélites por osciladores altamente estáveis, isto é, relógios atômicos de césio e rubídio, com estabilidade entre 10^{-12} e 10^{-13} segundos. O comprimento de onda da portadora L1 é $\lambda = 19,03$ cm (frequência de 1,57542 GHz), e da L2 é $\lambda = 24,42$ cm (frequência de 1,22760 GHz). Essas ondas portadoras são moduladas à partir de códigos PRN (*Pseudo-Random Noise* – ruído pseudoaleatório).

Os PRNs são códigos binários criados por algoritmos que geram seus valores em uma sequência de -1 e +1 ou 0 e 1, que parecem ter uma característica aleatória, no entanto, não é isso que ocorre, sendo então denominados pseudoaleatórios. Um dado satélite GNSS pode ser identificado por meio de um número relacionado a um segmento particular do PRN no qual é transmitido pelo satélite, sendo que cada satélite apresenta um PRN próprio. O princípio básico do posicionamento por GNSS consiste na medição de distâncias entre o satélite e o receptor, por meio do tempo de propagação do sinal do satélite até o receptor, com determinada taxa de observação (por exemplo, de cinco em cinco segundos).

Modernamente, satélites a partir do Bloco II-F já transmitem sinais nas portadoras L1, L2 e em uma terceira portadora denominada L5, com comprimento de onda de $\lambda = 25,48$ cm (frequência de 1,176145 GHz). Atualmente (Março de 2016), doze satélites GPS já transmitem sinais L1, L2 e L5, entretanto, o sinal L5 está oficialmente declarado como pré-operacional, embora já existam receptores GPS no mercado de tripla frequência (L1, L2 e L5), como por exemplo, Leica Viva GS10, Topcon Hiper V e Trimble R8.

No caso do GLONASS, atualmente os satélites transmitem sinais em duas frequências (G1 e G2), e alguns satélites dos blocos mais modernos K1 e M+ transmitem sinais em três frequências (G1, G2 e G3 ou L3). No caso do Beidou, os satélites transmitem sinais em três frequências (B1, B2 e B3 ou L5), enquanto no caso do Galileo, os satélites transmitem sinais em quatro frequências (E1, E5A, E5B, E6). No caso do QZSS, os satélites transmitem sinais em quatro frequências (L1, L2, L5 e L6), enquanto no caso do IRNSS, os satélites transmitem sinais em duas frequências (L5 e S). Muitas dessas frequências dos diferentes sistemas GNSS são iguais apesar da denominação diferente, conforme ilustra a Figura 1.21.

Para as medidas de distância entre o satélite o receptor, por meio dos sinais GNSS, podem ser utilizadas dois tipos de observação: Pseudodistância do código e fase da onda portadora.

2.1. PSEUDODISTÂNCIA

A pseudodistância é a distância medida entre o satélite e a antena do receptor obtida por meio de um código modulado sobre uma onda portadora. Ela é obtida pela multiplicação do tempo de propagação do sinal pela velocidade da luz no vácuo ($d = v \cdot t$), considerando um modelo teórico aproximado, isto é, desconsiderando os diversos erros envolvidos.

No caso do GPS, o código C/A (*Coarse Acquisition* – fácil aquisição) e o código P (*Precise or Protected* – preciso ou protegido) são sequências binárias de números (-1 e 1) modulados sobre as ondas portadoras L1 e L2 (Figura 2.3).

O receptor gera uma réplica do código produzido no satélite, sendo que o retardo entre a chegada de uma transmissão particular do código, gerado no satélite, e a sua réplica, gerada no receptor, é o tempo de propagação do sinal no trajeto entre o satélite e o receptor (Figura 2.4). Como existem vários erros envolvidos (erro do relógio do satélite, erro do relógio do receptor, erro orbital, atraso ionosférico e etc.), a distância obtida pelo código é chamada pela literatura de pseudodistância, ou seja, “falsa distância”. Geralmente, a pseudodistância advinda do código C/A possui uma precisão entre 0,2 e 0,3 m, enquanto a pseudodistância advinda do código P possui uma precisão entre 0,7 e 0,8 m, devido à criptografia do código, sendo que estas precisões dependem da tecnologia do receptor utilizado para rastrear os sinais GPS.

Dependendo do tipo do receptor GPS, pode-se obter uma, duas ou três pseudodistâncias, por meio dos códigos C/A e P1 modulados na L1 e do código P2 modulado na L2. O código P é criptografado, ou seja, necessita de uma técnica especial de processamento do sinal no receptor, como por exemplo, a técnica *Z-Tracking*. O processamento inerente a essas técnicas especiais faz com que a pseudodistância advinda do código P seja de qualidade inferior da advinda do código C/A, mesmo possuindo um comprimento de onda menor. Usualmente, denomina-se o código P criptografado, ou seja, com a técnica AS ativa, de código Y.

Atualmente, os satélites GPS transmitem o código C/A na L1, o código P (Y) na L1 e na L2, o código L2C na L2 (satélites a partir do bloco IIR-M), o código M na L1 e na L2 (novo código restrito para militares), os códigos I5 e Q5 na L5 (satélites a partir do bloco II-F), e, futuramente, irão transmitir ainda o código L1C na L1 (satélites a partir do novo bloco III, ainda não lançados). Satélites GLONASS transmitem os códigos abertos L1OF ou L1OC em L1 (G1), L2OF ou L2OC em L2 (G2), L3OC em L3 (G3), e os códigos restritos L1SF ou L1SC em L1 (G1), e L2SF ou L2SC em L2 (G2), dependendo da geração do satélite. Satélites Galileo transmitem os códigos primários I e Q em E5A e E5B e B e C em E1 e E6, além de diversos códigos secundários. Satélites Beidou transmitem o código aberto I em B1, B2 e B3 e o código restrito Q em B1, B2 e B3. Portanto, se for utilizado um receptor GNSS que rastreia dois ou mais sistemas GNSS, pode-se obter pseudodistâncias entre o receptor e os satélites por meio de diversos, até mesmo dezenas de códigos diferentes.

Futuramente, com a integração dos diversos sistemas GNSS em receptores multi-GNSS disponíveis em *smartphones*, por exemplo, espera-se um posicionamento instantâneo de maior precisão, da ordem de poucos metros ou até mesmo submétrica.

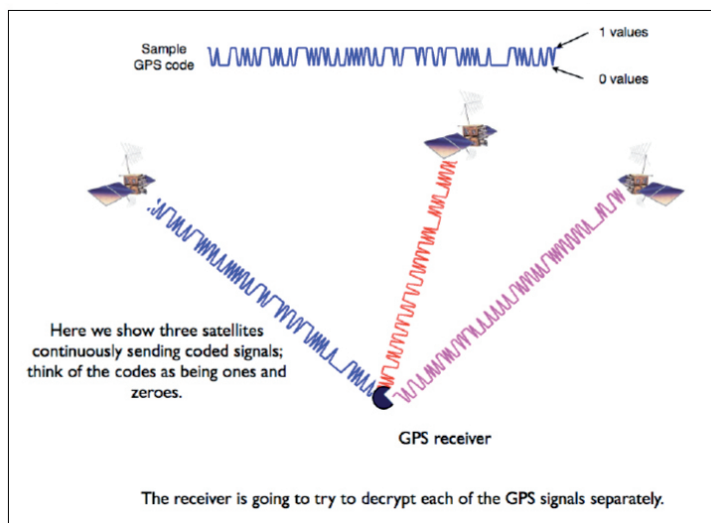


Figura 2.3 – Exemplo de pseudodistâncias advindas de três satélites por meio da codificação do sinal.

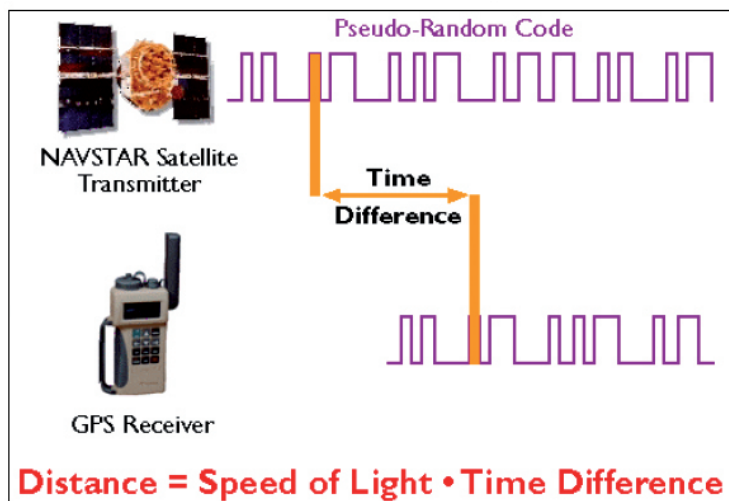


Figura 2.4 – Medição da distância entre o satélite e o receptor pela diferença de tempo do sinal codificado.

2.2. FASE DA ONDA PORTADORA

Ao invés de se utilizar códigos binários modulados sobre as ondas portadoras, as distâncias entre o satélite e o receptor podem ser obtidas diretamente a partir das próprias ondas portadoras. Esse tipo de observação, dada em ciclos de onda, é chamado de fase da onda portadora. A fase da onda portadora é uma observável muito mais precisa (precisão de poucos milímetros) do que a pseudodistância, e trata-se da observável básica para as atividades que envolvam um posicionamento de alta precisão. A medida da fase da portadora é obtida pela diferença entre a fase do sinal recebida do satélite e sua réplica gerada pelo receptor (Figura 2.5).

Na primeira medida, a observável é a parte fracional de um ciclo de onda. Não se conhece na primeira época de observação, o número inteiro de ciclos entre o satélite (s) e a antena receptora (r), denominado de ambiguidade (N). A partir da primeira época, o receptor consegue realizar a contagem de ciclos inteiros de onda que chega do satélite até a antena receptora (Figura 2.6). Isto faz com que a medida da fase da onda portadora seja ambígua, com relação a um número de ciclos inteiros, envolvidos entre a antena receptora e cada um dos satélites na primeira época de observação, isto é, na primeira medida realizada para cada satélite. Quando a ambiguidade é solucionada corretamente, ou seja, o número de ciclos inteiros da primeira época de observação é determinado corretamente para todos os satélites, o posicionamento resultante é de alta precisão, sendo denominada de “solução fixa”.

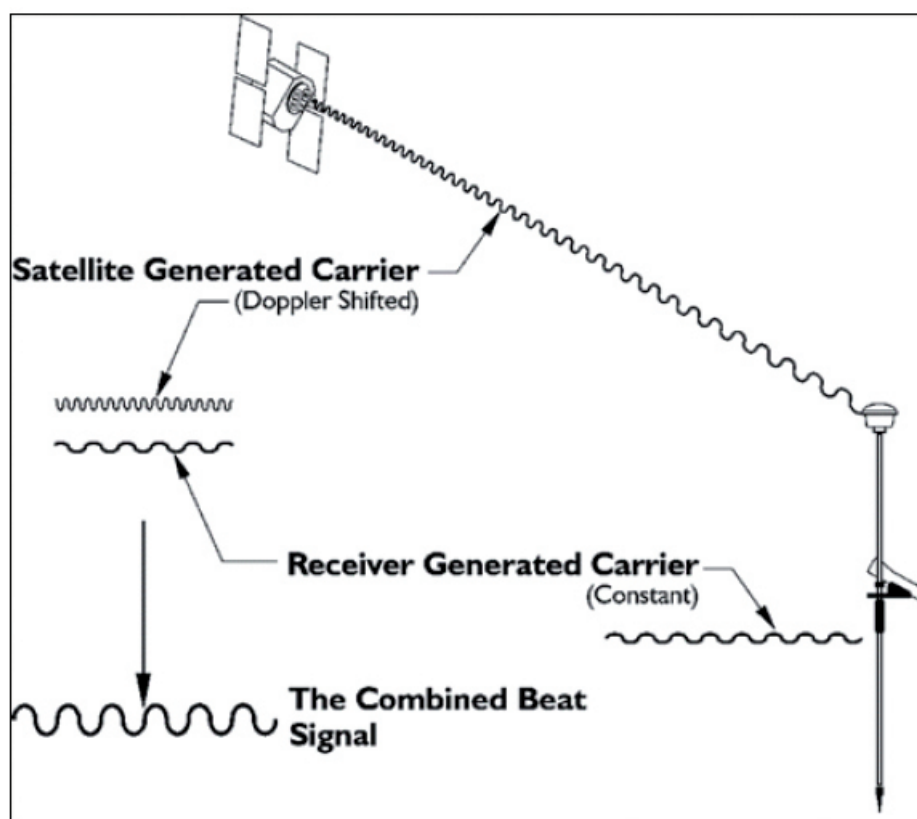


Figura 2.5 – Medição de distância entre o satélite e o receptor por meio da fase da onda portadora.

Matematicamente, a fase da onda portadora, em ciclos de onda, é dada por:

$$\varphi_r^s = \varphi^s - \varphi_r + \frac{c}{\lambda}(dt_r - dt^s) + N_r^s + \varepsilon_\varphi$$

onde φ_r^s é a fase da onda portadora no instante de recepção do sinal, φ^s é a fase do sinal do satélite recebida no receptor no instante de recepção do sinal, φ_r é a fase do sinal gerada no receptor no instante de recepção do sinal, c é a velocidade da luz, λ é o comprimento de onda da portadora, dt_r é o erro do relógio do receptor, dt^s é o erro do relógio do satélite, N_r^s é a ambiguidade da fase e ε_φ é o erro da fase da onda portadora. Em metros, a fase da onda portadora se torna:

$$\lambda \cdot \varphi_r^s = \lambda(\varphi^s - \varphi_r) + c(dt_r - dt^s) + \lambda \cdot N_r^s + \lambda \cdot \varepsilon_\varphi$$

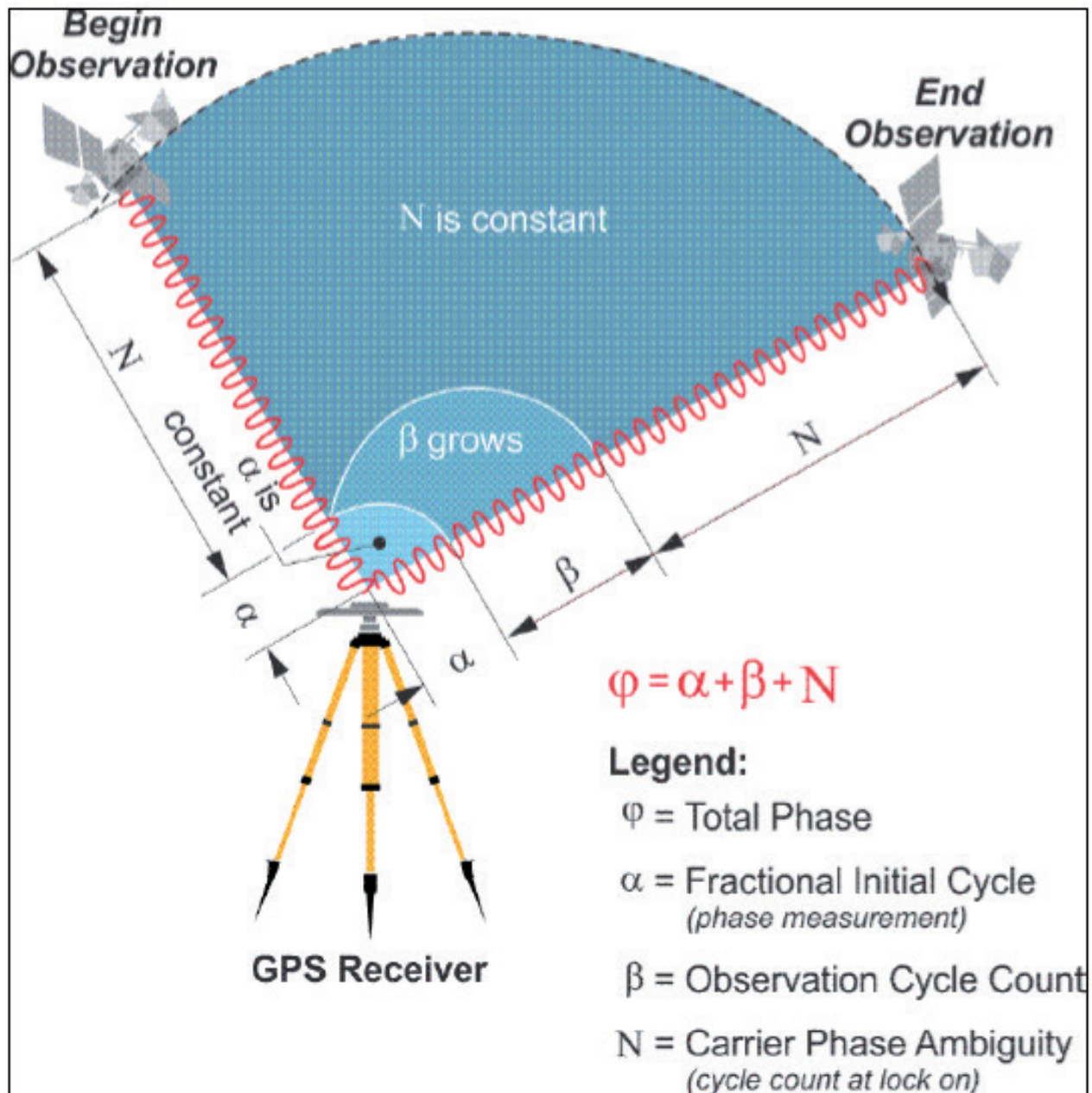


Figura 2.6 – Ambiguidade da fase da onda portadora na primeira época de observação.

Devido ao avanço sofrido pela observável fase da onda portadora ao atravessar a ionosfera, o efeito deste comporta-se de maneira oposta ao caso da pseudodistância, que por sua vez, sofre um retardo. Em outras palavras, a ionosfera causa um avanço na fase, provocando uma diminuição na distância obtida pela fase da onda portadora, porém, causa um retardo (atraso) na pseudodistância, provocando um aumento na distância medida.

A ambiguidade de cada satélite entra, juntamente com as coordenadas do receptor, como incógnita a ser estimada no processo do ajustamento, e teoricamente, as ambiguidades deveriam ser solucionadas como números inteiros de ciclos (N). Na prática, o ajustamento fornece uma solução em números reais (solução flutuante), e se utiliza de métodos para determinar uma solução com números inteiros (solução fixa), conforme será visto no capítulo 7.

Durante o processo de medição, o receptor produz ruído, gerando, desta forma, observáveis de pseudodistância e fase “ruidosas”. Como regra geral, o ruído (precisão) de uma observação é de aproximadamente 1% do comprimento

de onda. No entanto, recentes desenvolvimentos demonstram que uma menor precisão é atingida. De fato, vários autores salientam que tipicamente tem-se uma precisão de 0,2 a 0,3 m para a pseudodistância advinda do código C/A. Esse valor está condizente com o valor da precisão para a pseudodistância das estações da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo). Com relação às observações advindas do código P (Y) na L2, para a maioria das estações da RBMC, tem-se uma precisão da ordem de 0,7 a 0,8 m. Quanto à fase das portadoras, a precisão das medidas pode variar entre 1/1000 até 1/100 do comprimento de onda, ou seja, de décimos de mm até poucos mm para as portadoras L1, L2 e L5. O ruído do receptor é função somente da tecnologia utilizada pelo receptor.

2.3. ÓRBITAS DOS SATÉLITES

Satélites de sistemas GNSS e RNSS encontram-se em órbitas geoestacionárias, como alguns satélites do Beidou-2, IRNSS e dos SBAS, ou em órbitas médias inclinadas, como os dos sistemas GPS, GLONASS, Galileo, QZSS, e demais satélites do Beidou-2 e do IRNSS.

Uma órbita é geoestacionária quando esta órbita é circular e exatamente sobre o equador da Terra, isto é, nos pontos de latitude zero, e a sua rotação acompanha exatamente a rotação da Terra. Desta forma, para um observador que estiver situado sobre a superfície, o satélite pertencente a uma órbita geoestacionária permanece sempre na mesma posição, sendo utilizada em telecomunicações. A altitude de uma órbita geoestacionária é cerca de 35.786 km. No caso dos satélites GNSS em órbita média inclinada, a altitude é de cerca de 20.000 km, com período orbital de cerca de 12 horas, e a inclinação da órbita é variável em função do plano orbital do satélite (Figura 2.7).

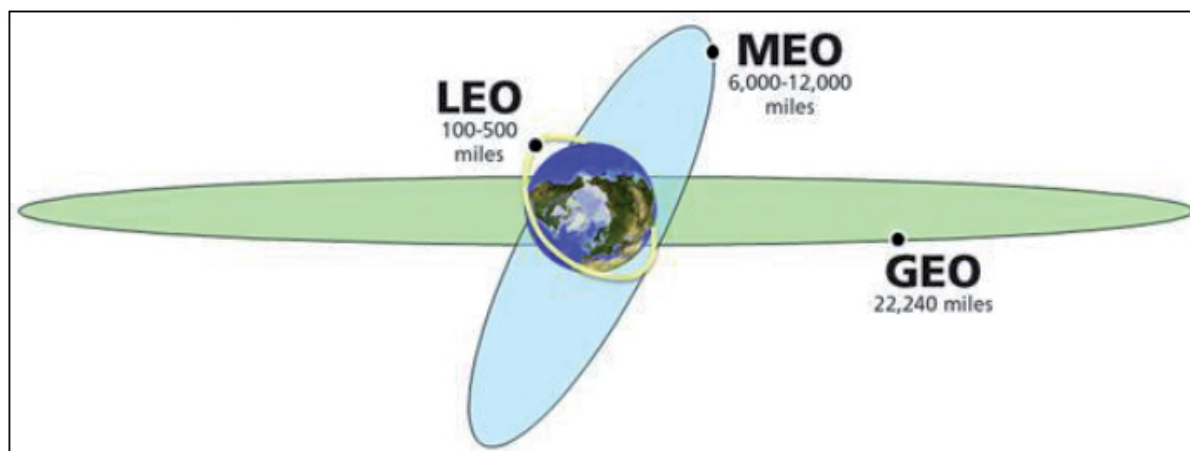


Figura 2.7 – Órbita baixa (LEO), média (MEO) e geoestacionária (GEO) de um satélite artificial.

Independente da altitude orbital, o movimento dos satélites pode ser aproximado (predito) por meio do movimento de uma órbita kepleriana. Órbita kepleriana ou normal é aquela em que se considera uma única força agindo no satélite, resultante da atração de uma Terra homogênea, isto é, com distribuição igual de massas, e perfeitamente esférica. A órbita normal é baseada nas três Leis de Kepler:

- Lei das órbitas (1609): Os planetas descrevem órbitas elípticas das quais o Sol ocupa um dos focos da elipse;
- Lei das áreas (1609): O raio vetor que une o Sol aos planetas descreve na elipse áreas iguais em tempos iguais;
- Lei dos períodos (1619): O quadrado do período da revolução planetária é proporcional ao cubo do semi-eixo maior da elipse orbital.

Os satélites orbitam em torno de uma elipse no espaço, o chamado plano orbital. A Terra é um dos focos desta elipse orbital. O satélite e a Terra são considerados corpos esféricos e homogêneos (com distribuição constante de massa). Os seis elementos orbitais keplerianos que definem o movimento de um satélite em sua órbita elíptica kepleriana são (Figura 2.8):

- a = semi-eixo maior da elipse orbital;
- e = excentricidade da órbita;
- Ω = ascensão reta do nodo ascendente (ponto em que o satélite em órbita passa do hemisfério sul para o hemisfério norte, relativo ao plano equatorial);
- i = ângulo de inclinação da órbita (plano orbital) em relação ao plano equatorial;
- ω = argumento ou ângulo de inclinação do perigeu (ponto no qual o satélite se encontra mais próximo da Terra) em relação ao nodo ascendente;
- t = época da passagem pelo perigeu.

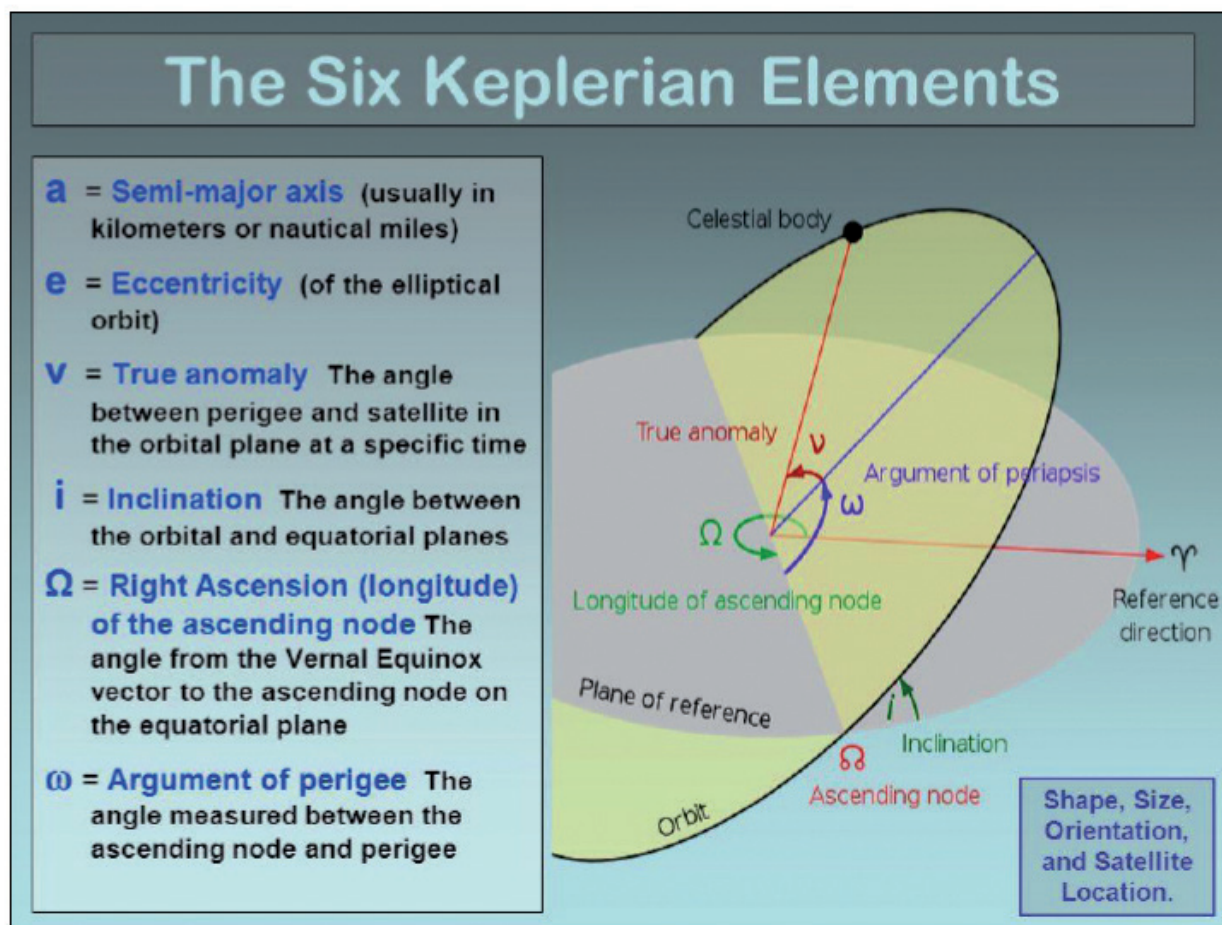


Figura 2.8 – Elementos keplerianos que descrevem a órbita normal de um satélite.

Para saber a posição do satélite em um dado momento (coordenadas x, y no plano orbital), deve-se conhecer a anomalia verdadeira, isto é, o ângulo entre o perigeu e o satélite no plano orbital no instante considerado. Do sistema plano orbital (x, y), pode-se obter as coordenadas 3D (X, Y, Z) dos satélites no sistema terrestre, em WGS-84 G1762, por exemplo, em função dos elementos keplerianos.

Os elementos keplerianos descrevem uma órbita teórica do satélite, onde se considera apenas a força de atração de uma Terra esférica e homogênea. Porém, diversas outras forças agem no movimento do satélite, fazendo com que a posição real se afaste de sua posição kepleriana, resultando nos chamados elementos perturbadores da órbita, também presentes nas mensagens de navegação. Exemplos de outras forças atuando sobre o satélite: atração devido ao achatamento e distribuição não homogênea de massas da Terra; atração devido ao Sol, a Lua e outros planetas; atração devido ao atrito atmosférico; atração devido à pressão da radiação solar e etc. (Figura 2.9).

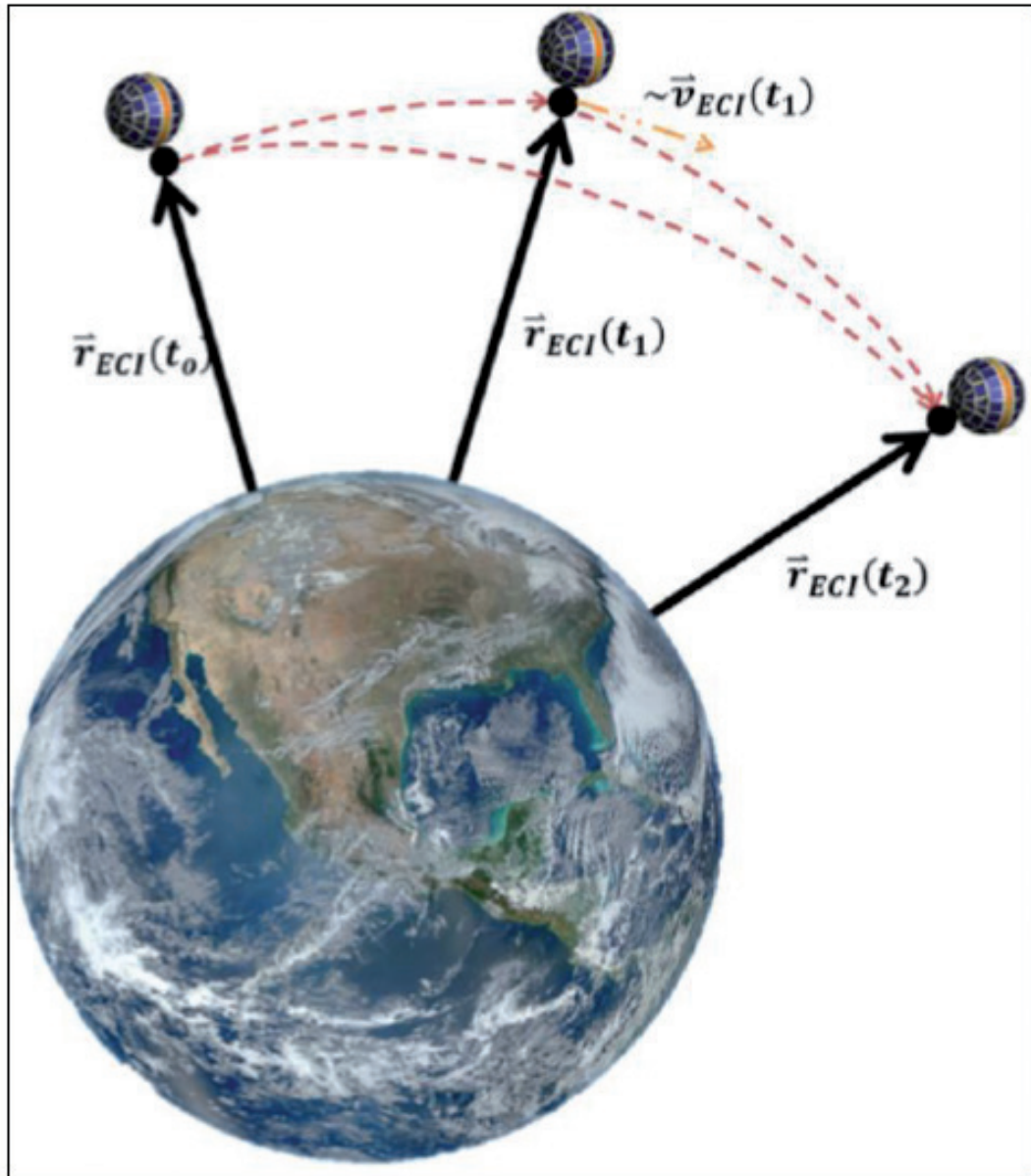


Figura 2.9 – Exemplo de órbita normal (teórica) e órbita perturbada (real) de um satélite.

2.4. EFEMÉRIDES TRANSMITIDAS E EFEMÉRIDES PRECISAS

Para obter a posição de um receptor GNSS deve-se conhecer as distâncias até os satélites e as coordenadas dos satélites. Essas informações são obtidas por meio dos arquivos de efemérides transmitidas (extensões .n, .g, .e, .c, .j, .i) e de observação (extensão .o). As efemérides são produzidas pelas estações monitoras dos sistemas GNSS. Tratam-se de previsões das órbitas dos satélites que são transmitidas aos satélites para serem enviadas aos usuários por meio dos sinais GNSS (Figura 2.10). O objetivo final do usuário é obter as coordenadas dos satélites em um sistema de referência terrestre. No caso das efemérides transmitidas do GPS, este referencial é o WGS-84 G1762, no caso do GLONASS, é o PZ-90.11, no caso do Galileo, é o GTRF14v01, no caso do Beidou, é o CGS 2012, e no caso do QZSS, é o JSG2010.

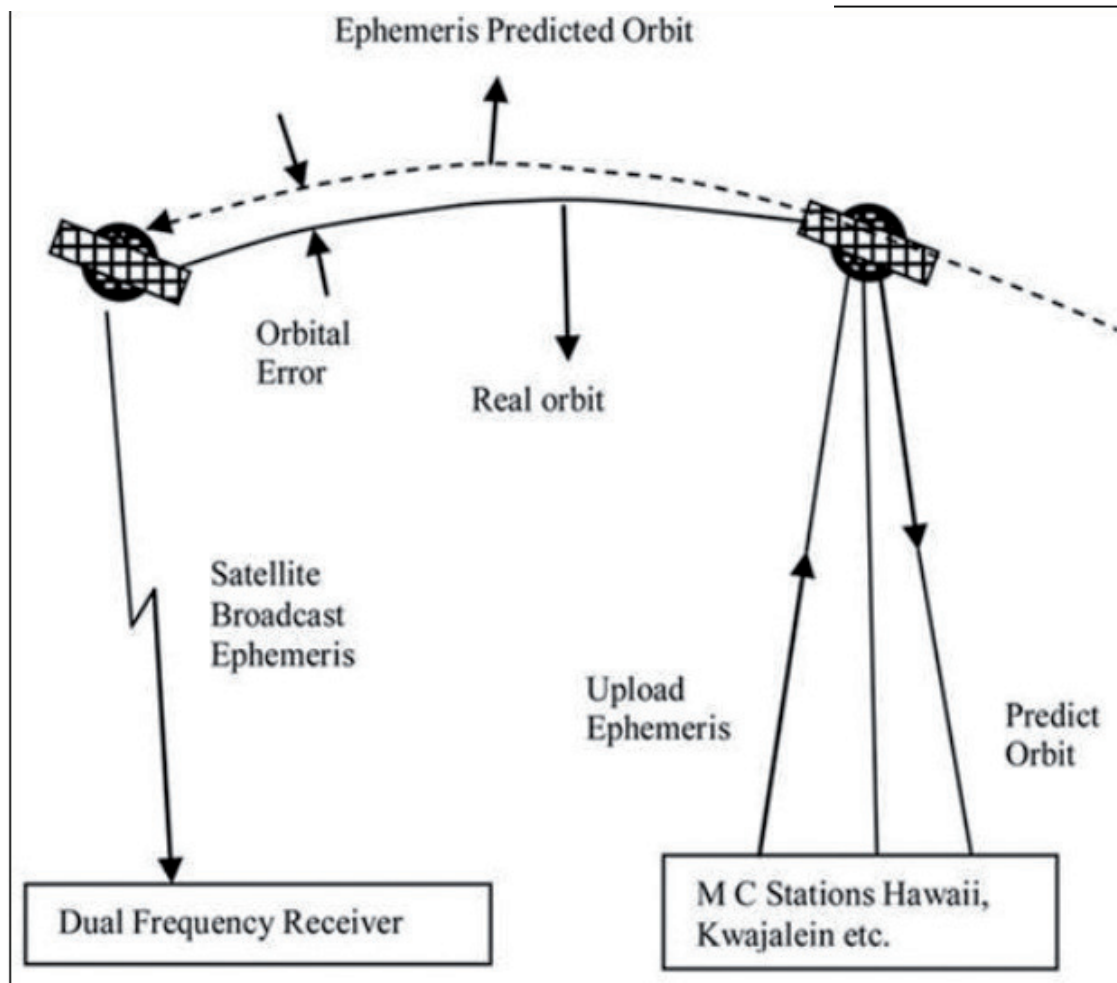


Figura 2.10 – Predição da órbita e atualização das efemérides transmitidas por meio das estações monitoras.

Embora o sistema de controle do GPS faça a predição das órbitas no sistema de coordenadas cartesianas geocêntricas X,Y,Z (em WGS-84), visando economia de armazenamento de dados, estas são convertidas em elementos orbitais keplerianos e perturbadores. Para obter as coordenadas cartesianas WGS-84 deve-se solucionar algumas equações que estão em função desses elementos. Nas efemérides transmitidas, os elementos keplerianos e perturbadores de cada satélite possibilitam o cálculo das coordenadas dos satélites em WGS-84 até duas horas antes ou depois da época origem, geralmente na época de transmissão do sinal. Em outras palavras: elementos keplerianos + elementos perturbadores da órbita normal = Transformação de x,y (plano orbital) para X,Y,Z (WGS-84). É importante salientar que além dos elementos orbitais, as efemérides transmitidas fornecem correções para o erro do relógio dos satélites e também parâmetros de um Modelo Global da ionosfera (Modelo de Klobuchar).

Diferentemente do sistema GPS, as efemérides transmitidas da constelação GLONASS são disponibilizadas a partir da posição (coordenadas dos satélites em PZ-90.11), velocidade, aceleração e alguns elementos keplerianos. Sendo assim, para o cálculo da órbita da constelação do GLONASS deve-se utilizar o modelo orbital recomendado pelo Documento de Interface do GLONASS (*GLONASS Interface Control Document 1995 – ICD-95*).

Para usuários que não necessitam de posição instantânea, mas sim de alta precisão, há a opção de acessar, via internet, as efemérides pós-processadas, denominadas efemérides precisas, produzidas por diversos centros de análise de dados GNSS, como o IGS (*International GNSS Service – serviço GNSS internacional*). As efemérides precisas do IGS podem ser preditas, ultra-rápidas, rápidas e finais (Figura 2.11).

Nas efemérides precisas, são fornecidas as coordenadas cartesianas geocêntricas (X,Y,Z) dos satélites no ITRF (*International Terrestrial Reference Frame – rede de referência terrestre internacional*) vigente (atualmente, ITRF2014),

e correções dos relógios dos satélites no sistema GPS. As efemérides precisas também são baseadas nas observações de uma rede mundial de receptores de todos sistemas GNSS. As efemérides precisas do IGS podem ser obtidas no seguinte endereço eletrônico: <https://igscb.jpl.nasa.gov/components/prods.html>.

GPS Satellite Ephemerides / Satellite & Station Clocks					
Type		Accuracy	Latency	Updates	Sample Interval
Broadcast	orbits	~100 cm	real time	--	daily
	Sat. clocks	~5 ns RMS ~2.5 ns SDev			
Ultra-Rapid (predicted half)	orbits	~5 cm	real time	at 03, 09, 15, 21 UTC	15 min
	Sat. clocks	~3 ns RMS ~1.5 ns SDev			
Ultra-Rapid (observed half)	orbits	~3 cm	3 - 9 hours	at 03, 09, 15, 21 UTC	15 min
	Sat. clocks	~150 ps RMS ~50 ps SDev			
Rapid	orbits	~2.5 cm	17 - 41 hours	at 17 UTC daily	15 min
	Sat. & Stn. clocks	~75 ps RMS ~25 ps SDev			5 min
Final	orbits	~2.5 cm	12 - 18 days	every Thursday	15 min
	Sat. & Stn. clocks	~75 ps RMS ~20 ps SDev			Sat.: 30s Stn.: 5 min
Note 1: Orbit accuracies are 1D mean RMS values over the three XYZ geocentric components. IGS accuracy limits, except for predicted orbits, are based on comparisons with independent laser ranging results and discontinuities between consecutive days. The precision is better.					
Note 2: The accuracy (neglecting any contributions from internal instrumental delays, which must be calibrated separately) of all clocks is expressed relative to the IGS timescale, which is linearly aligned to GPS time in one-day segments. The standard deviation (SDev) values are computed by removing a separate bias for each satellite and station clock, whereas this is not done for the RMS values.					

Figura 2.11 – Efemérides transmitidas (broadcast) e efemérides precisas do IGS para o GPS.

2.5. DILUIÇÃO DA PRECISÃO

DOP (*Dilution Of Precision* – diluição da precisão) é um termo usado em navegação por satélite para especificar o efeito multiplicativo adicional da geometria da constelação dos satélites visíveis na precisão das medidas de um receptor. Assume-se que a precisão do posicionamento (σ) é igual ao produto entre a precisão da medida de distância satélite-receptor (σ_0) e o DOP, obtido em função da geometria da constelação de satélites visíveis para este receptor (Figura 2.12).

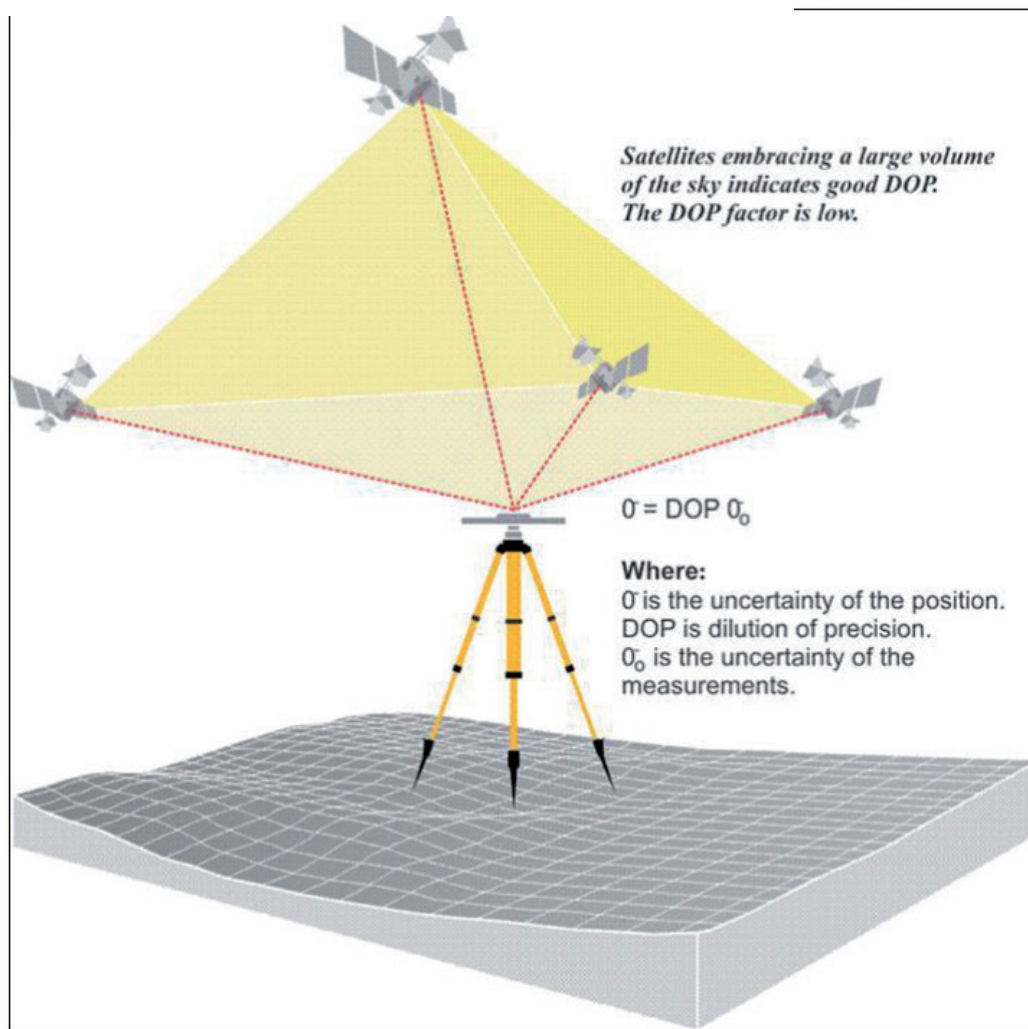


Figura 2.12 – Diluição da precisão (DOP) no posicionamento em função da configuração espacial dos satélites.

Existem vários tipos de DOP, a saber: HDOP (*Horizontal DOP*), VDOP (*Vertical DOP*), PDOP (*Positional DOP* – resultante 3D do HDOP e do VDOP), TDOP (*Time DOP* – referente ao padrão de tempo), GDOP (*Geometric DOP*, efeito resultante do PDOP e do TDOP).

O PDOP é inversamente proporcional ao volume (V) do poliedro formado entre o receptor e a constelação de satélites ($PDOP = 1 / V$). Ou seja, quanto maior for a distância (abertura) entre os satélites, maior será o volume deste poliedro, e consequentemente, menor será o PDOP (situação ideal, ver a Figura 2.13).

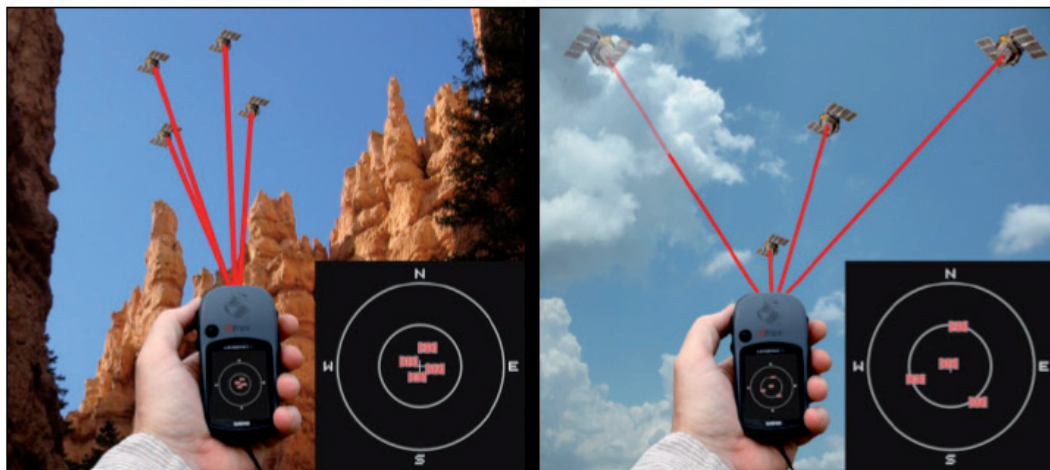


Figura 2.13 – Posicionamento com PDOP alto (ruim) a esquerda, e com PDOP baixo (bom) a direita.

Atualmente, a questão dos valores de DOP não é mais crítica, pois, geralmente, dispõe-se de um número de satélites visíveis maior do que 4 e os valores do PDOP são em geral menores ou iguais a 4. No entanto, os diferentes DOP são úteis no planejamento de levantamentos onde pode ocorrer a obstrução do sinal, pois a inclusão desta informação nos softwares de planejamento pode auxiliar na definição do melhor horário para o rastreamento. O planejamento de um levantamento GNSS considerando estas questões pode ser feito gratuitamente por meio do seguinte endereço eletrônico: <http://www.gnssplanningonline.com/#/Settings>. A Tabela 2.1 apresenta uma classificação para os valores de DOP.

Tabela 2.1 – Classificação para diferentes valores de DOP.

Valor do DOP	Classificação	Descrição
1	Ideal	DOP utilizado para as aplicações que exigem a maior precisão possível.
1-2	Excelente	Neste nível, as medidas ainda são consideradas precisas o suficiente.
2-5	Bom	São considerados os valores máximos aceitáveis para alta precisão.
5-10	Moderado	É possível fazer posicionamento, embora a precisão final seja afetada.
10-20	Ruim	A precisão é baixa, e as medidas devem, se possível, ser descartadas.
> 20	Muito pobre	Nestes casos, a precisão das medidas é piorada no mínimo 20x.

2.6. FORMATO DE ARQUIVOS RINEX

Para facilitar o intercâmbio de dados GNSS foi desenvolvido o formato RINEX (*Receiver INdependent EXchange format*), o qual consiste de três arquivos ASCII (*American Standard Code for Information Interchange* – código padrão americano para o intercâmbio de informação): arquivo de observações (extensão .o), arquivo de dados meteorológicos (extensão .m) e arquivo de mensagens de navegação (extensão .n para GPS, extensão .g para GLONASS, extensão .e para Galileo, extensão .c para Beidou/Compass, extensão .j para QZSS, extensão .i para IRNSS, extensão .s para SBAS).

Existem várias versões de arquivos no formato RINEX, e existe um programa gratuito para conversão de dados GNSS de qualquer fabricante para o formato RINEX, chamado TEQC (*Translation, Edition and Quality Control* – tradução, edição e controle de qualidade), desenvolvido pela UNAVCO em Colorado/EUA, e disponível no seguinte endereço eletrônico: <https://www.unavco.org/software/data-processing/teqc/teqc.html>. Salienta-se que a maioria dos fabricantes de receptores GNSS fornece em seus *softwares* de processamento de dados a opção de conversão para o formato universal RINEX.

Atualmente (Abril de 2016), a versão mais recente do RINEX é a versão 3.03, e um exemplo de arquivo de observações (medições) é apresentado nas Figuras 2.14, 2.15 e 2.16, enquanto um exemplo de arquivo de navegação (efemérides transmitidas) é apresentado na Figura 2.17. Para mais detalhes sobre o formato RINEX 3.03, consultar o seguinte endereço eletrônico: <ftp://igs.org/pub/data/format/rinex303.pdf>.

TABLE A4		GNSS OBSERVATION DATA FILE - EXAMPLE #1	
3.03	OBSERVATION DATA	M	RINEX VERSION / TYPE
S = GPS R = GLONASS E = GALILEO S = GEO M = MIXED			COMMENT
EXRINEX V9.9	AIUB	20040324 144333	UTC PCN / RUN BY / DATE
EXAMPLE OF A MIXED RINEX FILE VERSION 3.03			
The file contains L1 pseudorange and phase data of the			
geostationary AOR-E satellite (PRN 120 = 820)			
A 9080			MARKER NAME
9080.1.34			MARKER NUMBER
BILL SMITH			OBSERVER / AGENCY
E1234A123	ABC INSTITUTE		REC # / TYPE / VERS
E1234	GEODETIC	1.3.1	ANT # / TYPE
4375274.	NOVER		APPROX POSITION XYZ
	587466.	4589095.	
	.9030	.0600	ANTENNA: DELTA H/E/N
0			RCV CLOCK OFFS APPL
5 C1C L1W L2W C1W B2W			SYS / # / OBS TYPES
2 C1C L1C			SYS / # / OBS TYPES
2 L1B L51			SYS / # / OBS TYPES
2 C1C L1C			SYS / # / OBS TYPES
18.000			INTERVAL
S APPL_DCB	xyz.uvw.abc/pub/dcb_gps.dat		SYS / DCBS APPLIED
DBZ			SIGNAL STRENGTH UNIT
2006 03 24 13 16 36.0600000	GPS		TIME OF FIRST OBS
18 R01 1 R02 2 R03 3 R04 4 R05 5 R06 -6 R07 -5 R08 -4			GLONASS SLOT / PRQ #
R09 -3 R10 -2 R11 -1 R12 0 R13 1 R14 2 R15 3 R16 4			GLONASS SLOT / PRQ #
R17 5 R18 -5			GLONASS SLOT / PRQ #
C L1C			SYS / PHASE SHIFT
C L1W			SYS / PHASE SHIFT
C L2W	0.00000		SYS / PHASE SHIFT
R L1C			SYS / PHASE SHIFT
R L1B			SYS / PHASE SHIFT
R L51			SYS / PHASE SHIFT
S L1C			SYS / PHASE SHIFT
C1C -10.000 C1P -10.123 C2C -10.432 C2P -10.634			GLONASS COO/FREQ/BIS
END OF HEADER			

versão do rinex (3.03) e tipo do arquivo (de observação)

software executador e data (ano mês dia, horas minutos segundos em UTC)

nome da estação (identificador)

nome do operador e companhia

modelo do receptor, tipo de ponto rastreado e versão do receptor

modelo da antena e tipo (base ou rover)

posição aproximada do ponto rastreado

altura da antena e deslocamento planimétrico da antena em relação ao ponto aplicar o erro do relógio derivado em tempo real (0 = não e 1 = sim)

sistema GNSS (G = GPS, R = GLONASS, E = Galileu, C = Compass/Baidu e tipos de observação (em geral C para pseudodistância e L para portadora)

tempo de observação (rastreo) em segundos

correções de desvio do código diferencial (aplicações de alta precisão)

unidade de potência do sinal (dBHz)

instante da primeira observação (ano mês dia horas minutos segundos e sistema)

número de satélites GLONASS, identificação de cada satélite e frequência (-6 até +7)

sistema GNSS e deslocamento da fase

correção do deslocamento da fase para alinhar observáveis GLONASS de código e fase final do cabeçalho do arquivo RINEX

Figura 2.14 – Exemplo de cabeçalho de um arquivo RINEX de observações (extensão .o).

> 2006 03 24 13 10 36.9000000 0 5									
G06	23659347.915					-0.123456789012			24.158
G09	2081534.648					-1353 4	23659347.158		38.123
G12	20667600.189					-158 6	2081534.292		35.214
E11	.324 8					-394 5	20667600.848		
E20	38117559.596								
> 2006 03 24 13 10 36.9000000 0 7									
G06	23619095.450					-0.123456789210			25.234
G09	20816075.667					-41981.375 4	23619095.008		42.211
G12	20611072.689					-22354.535 7	20816075.101		36.765
E21	21345678.576					14219.770 6	20611072.410		
E22	2213456.789								
E11	45832.123 5								
E20	38117559.596								
> 2006 03 24 13 11 12.9000000 2 2									
*** FROM NOW ON KINEMATIC DATA! ***									
TWO COMMENT LINES FOLLOW DIRECTLY THE EVENT RECORD									
						COMMENT			COMMENT

Idade da observação [ano mês dia hora minutos segundos], data da época [B - CG, 1 = primeira observação entre épocas anteriores e 2 = última], 3 = fixação estatística, número de satélites recebidos, ano do século do receptor [por exemplo: 2006 03 24 13 10 36.9000000 0 5], identificação da estação, observações [exemplo: código: G06, hora da 1ª, hora da 12ª, código: 06, período da hora]

Repetição para demais épocas [parte que nos 'lases' das postadoras e contado o número de ciclos inteiros a partir da primeira época de observação]

Eventos especiais [1]: 2 (fim do movimento da antena), 3 (nova estação ocupada no final do modo dinâmico), deve seguir abaixo o nome do seu ponto), 4 (perda de informações do subconjunto), 5 (evento interno), 6 (perda de algum ciclo inteiro)

2 Mudança para o modo dinâmico

Figura 2.15 – Continuação do arquivo RINEX com as observações (medições).

Continuidade do rastreo GNSS no modo cinemático (note pela fase das portadoras que não houve perda de sinal/ciclos)									
3: Final do modo cinemático / ocupação de novo marco									
Identificação do novo ponto									
Número do novo ponto									
Altura da antena do novo ponto									
Rastreo GNSS no novo ponto									
Exemplos de alertas de época									
Mais uma época de rastreo no novo ponto									
Final do arquivo RINEX de observações									
Continuidade do rastreo GNSS no modo cinemático (note pela fase das portadoras que não houve perda de sinal/ciclos)									
3: Final do modo cinemático / ocupação de novo marco									
Identificação do novo ponto									
Número do novo ponto									
Altura da antena do novo ponto									
Rastreo GNSS no novo ponto									
Exemplos de alertas de época									
Mais uma época de rastreo no novo ponto									
Final do arquivo RINEX de observações									

Figura 2.16 – Continuação e final do arquivo RINEX de observações.

TABLE ALL									
GNSS NAVIGATION MESSAGE FILE - EXAMPLE MIXED GPS/GLONASS									

3.03	M: GNSS NAV DATA	M: MIXED	RINEX VERSION / TYPE						
EXAMPLE V3	AUTH	20061002 000113 UTC FOR / RUN BY / DATE	COMMENT						
EXAMPLE OF VERSION 3.03 FORMAT									
GPST	0.1023E+07	0.7431E+08	-0.3960E-07	-0.3960E-07	IONOSPHERIC CORR				
GPSE	0.8804E+05	0.0000E+00	-0.1562E+06	-0.6554E+05	IONOSPHERIC CORR				
GPOT	0.279367223E-08	0.000000000E+00	1.47456 1395		TIME SYSTEM CORR				
GLST	0.7823109426E-06	0.000000000E+00	0 1395		TIME SYSTEM CORR				
LEAP SECONDS									
END OF HEADERS									
001	2006 10 01 00 00	0.79864545751E-04	0.227373673442E-11	0.00000000000E+00					
	0.56000000000E+02	-0.78750000000E+01	0.375628504827E-08	0.26312993612E+01					
	-0.4116457798E-06	0.64015010139E-02	0.38109719753E-05	0.51537185287E+04					
	0.00000000000E+00	0.782310962677E-07	0.188667086536E+00	0.39115548133E-07					
	0.989018441512E+00	0.220623750000E+03	-0.178432589759E+01	-0.7752517754E-08					
	0.82860594331E-10	0.00000000000E+00	0.13950000000E+04	0.00000000000E+00					
	0.20000000000E+01	0.00000000000E+00	0.32562560111E-08	0.54000000000E+02					
	-0.60000000000E+02	0.40000000000E+01							
002	2006 10 01 00 00	0.402349665460E-04	0.386535248253E-11	0.00000000000E+00					
	0.13500000000E+03	0.48750000000E+02	0.478269521862E-08	0.238713891022E+01					
	0.26071203708E-05	0.87657532181E-02	0.8191334637E-05	0.515372778320E+04					
	0.00000000000E+00	0.46977832885E-07	0.19518673898E+01	0.128522515297E-06					
	0.94863052825E+00	0.21812500000E+03	0.21316500377E+01	-0.79414022198E-08					
	-0.43787538212E-09	0.00000000000E+00	0.13950000000E+04	0.00000000000E+00					
	0.20000000000E+01	0.00000000000E+00	0.17229467630E-07	0.39100000000E+03					
	-0.60000000000E+02	0.40000000000E+01							
001	2006 10 01 00 15	0.0.37668102980E-04	0.45474735888E-11	0.90000000000E+02					
	0.157594921875E+05	-0.145566368103E+01	0.00000000000E+00	0.00000000000E+00					
	-0.813711474609E-04	0.205606799161E+01	0.93132257461E-09	0.70040000000E+01					
	0.18141339438E+03	0.215188488770E+01	0.186264514921E-08	0.10000000000E+01					
002	2006 10 01 00 15	0.0.506537035108E-04	0.18189894835E-11	0.30000000000E+02					
	0.155594342773E-05	-0.419844954360E+00	0.00000000000E+00	0.00000000000E+00					
	-0.19901128882E-03	0.224192047116E+00	0.93132257461E-09	0.10000000000E+01					
	0.35533549228E+04	0.35246609191E+01	0.186264514921E-08	0.10000000000E+01					

Verão do RINEX, tipo do arquivo (Navegação misto: GPS e GLONASS)
software, executor e data (ano mês dia, horas minutos e segundos em UTC)

Parâmetros de correção ionosférica

Parâmetros para transformar o sistema de tempo em UTC

Número atual de segundos bissextos (para manter o tempo astronômico alinhado com o tempo atômico internacional)

Final do cabeçalho

Identificação do satélite, época (ano mês dia horas minutos segundos), elementos contidos nas efemérides transmitidas (elementos keplerianos e perturbadores da órbita, erro do relógio do satélite)

Repetição para os demais satélites

Versão do RINEX, tipo do arquivo (Navegação mista: GPS e GLONASS)
software, executor e data (ano mês dia, horas minutos e segundos em UTC)

Parâmetros de correção ionosférica
Parâmetros para transformar o sistema de tempo em UTC
Número atual de segundos bissextos [para manter o tempo astronômico alinhado com o tempo atômico internacional]
Fim do cabeçalho
Identificação do satélite, época [ano mês dia horas minutos segundos], elementos contidos nas efemérides transmitidas (elementos keplerianos e perturbadores da órbita, erro do relógio do satélite)
Repetição para os demais satélites

Figura 2.17 – Exemplo de um arquivo de navegação (efemérides transmitidas) no formato RINEX.

As efemérides precisas, ao contrário das efemérides transmitidas, não são fornecidas no formato RINEX, mas sim no formato denominado SP3 (extensão .sp3, ver a Figura 2.18).

/* Natural Resources Canada (NRCan-formerly EMR)[R removed]					semana GPS (dia do ano, data)
/* SOLUTION FINAL: GPS-WEEK 1886.2 (DAY 061, 2016_02_01)					período de dados (ano mês dia horas minutos segundos)
/* FROM: 2016 03 01 00 00 00 TO: 2016 03 01 23 59 59					Primeira época de dados
/* PCV: IGS08_1887 OL/AL: FES2004 NONE Y ORB: CoN CLK: CoN					Identificação do satélite, coordenadas X, Y, Z (em km), correção do relógio do satélite (em nanossegundos)
* 2016 3 1 0 0 0.00000000					
PG01	10138.887745	-20456.557721	-13455.830126	13.099391	
PG02	-21691.921851	13338.131163	-6326.904878	599.420743	
PG03	1061.483808	-13622.426743	-21432.532461	-30.689569	
PG05	-20431.536243	5143.439406	16220.600227	-141.630304	
PG06	-19096.425619	760.039326	-17364.616003	153.325973	
PG07	-3499.233739	-14614.719039	21364.673136	467.393726	
PG08	7359.468846	-20268.667408	16560.334189	-25.775088	
PG09	-8251.433517	-24676.996501	5279.387428	80.766881	
PG10	24180.898578	10741.221674	2656.127028	36.064124	
PG11	9200.095853	-24495.982207	-4935.407018	-694.641259	
PG12	-5954.063294	13605.925784	-22294.554105	370.525328	
PG13	-12564.246180	12804.740394	19479.847613	-0.092308	
PG14	12942.499722	12167.944697	-18189.092662	0.140820	
PG15	-2772.023799	22149.902524	12004.428064	-299.569719	
PG16	20869.242576	-2417.559595	16297.546090	-25.782522	
PG17	-13681.651384	-14502.264565	-17315.614120	-201.400956	
PG18	16678.988072	16279.637660	13502.973406	488.778663	
PG19	-15149.551566	-2206.909399	-21894.470932	-525.050329	
PG20	-4833.674304	13130.335823	21132.236360	396.236308	
PG21	9957.126294	12676.658751	21847.673703	-512.798313	
PG22	21261.772851	-4894.372398	-15047.831523	359.121460	
PG23	-499.663054	-23716.336079	-5446.543213	-162.476663	
PG24	-12376.261100	20566.938749	-10630.293303	-13.204974	
PG25	6149.782796	16713.097328	-19143.105903	-125.923274	
PG26	25244.761991	9440.667255	7586.891245	-274.677211	
PG27	12699.935887	-10285.186170	20889.147949	67.588219	
PG28	-22771.190969	-19277.984629	4075.991796	505.919275	
PG29	4815.197291	26019.434007	2566.797597	655.121064	
PG30	-14894.445972	-7999.886675	20718.797192	101.914750	
PG31	21141.860725	-2671.511615	-15972.725760	280.427286	
* 2016 2 1 0 15 0.00000000					Segunda época de dados (intervalo de 15 minutos)
PG01	11222.915421	-21219.842920	-11081.182208	13.100221	
PG02	-21239.673788	12453.041030	-8979.761625	599.420654	
PG03	3416.817502	-14872.538809	-21738.853767	-30.693670	
PG05	-22038.473198	4423.020066	14232.628083	-141.627788	
PG06	-18421.471849	-740.282603	-19106.101692	153.331403	
PG07	-3619.522110	-16113.629628	20842.423964	467.392185	
PG08	7913.381943	-18467.667293	17418.016973	-25.776769	

Figura 2.18 – Exemplo de arquivo de efemérides precisas no formato SP3.

3. Erros Envolvidos no Posicionamento GNSS

As observáveis GNSS, ou seja, as medidas de distância entre um satélite e um receptor, estão sujeitas aos mais diversos tipos de erros. As fontes de erros podem ser o próprio satélite e/ou o próprio receptor, ou até mesmo a estação GNSS (ponto topográfico), mas, principalmente, a propagação do sinal GNSS na atmosfera terrestre. O tratamento desses erros de forma adequada é de extrema importância na obtenção de resultados de alta precisão. Em trabalhos de baixa precisão, muitos desses erros podem ser negligenciados. Assim, nota-se que o tratamento dos erros varia de acordo com a precisão requerida. Muitos deles são cancelados no posicionamento relativo ou reduzidos na adoção de modelos matemáticos adequados, ou seja, mais sofisticados e complexos, dependendo do software de processamento utilizado.

Em uma análise geral, do ponto de vista do ajustamento de observações, erros são introduzidos no processo de estimativa da posição dos receptores se o modelo matemático adotado é muito simples e não está em alta concordância com a realidade física. Porém, dependendo da aplicação, modelos matemáticos simples são suficientes. Por exemplo: As equações envolvidas no posicionamento por ponto simples aplicadas em navegação e levantamentos de baixa precisão. Outros exemplos de simplificações: A simplificação feita ao se considerar que o sinal viaja sempre no vácuo quando na realidade não é isso que ocorre, pois este também passa pela ionosfera e pela troposfera. Como toda grandeza mensurada, isto é, determinada por medições, as observáveis GNSS estão sujeitas aos erros aleatórios, sistemáticos e grosseiros.

Os erros sistemáticos geralmente podem ser parametrizados, isto é, modelados como novas incógnitas no processo de ajustamento, ou reduzidos por técnicas especiais de observação, isto é, no momento do rastreamento/coleta dos dados. Além disso, os erros sistemáticos podem ser determinados por modelos apropriados e retirados (minimizados) das observações antes da realização do ajustamento para a obtenção das coordenadas. A maioria dos erros envolvidos no posicionamento GNSS são erros sistemáticos. Os erros grosseiros são oriundos de falhas humanas e/ou do equipamento (“pane”) e devem ser evitados ao máximo. Por fim, os erros aleatórios são inevitáveis e, portanto, são considerados, modernamente falando, como sendo uma propriedade inerente da observação. Pode-se considerar que o ruído da observável é um exemplo de erro aleatório. A Figura 3.1 apresenta o efeito dos tipos de erros no posicionamento GNSS, enquanto a Tabela 3.1 e a Figura 3.2 apresentam algumas fontes de erro no posicionamento GNSS.

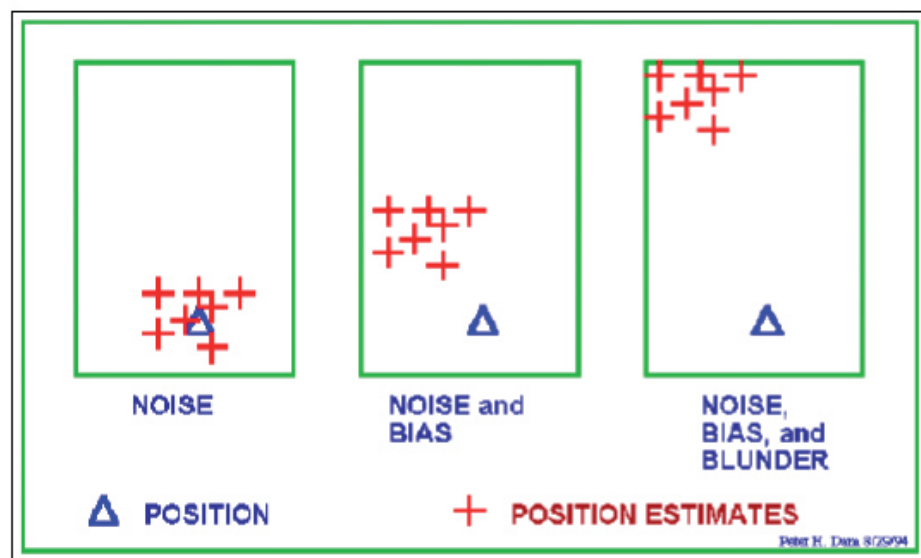
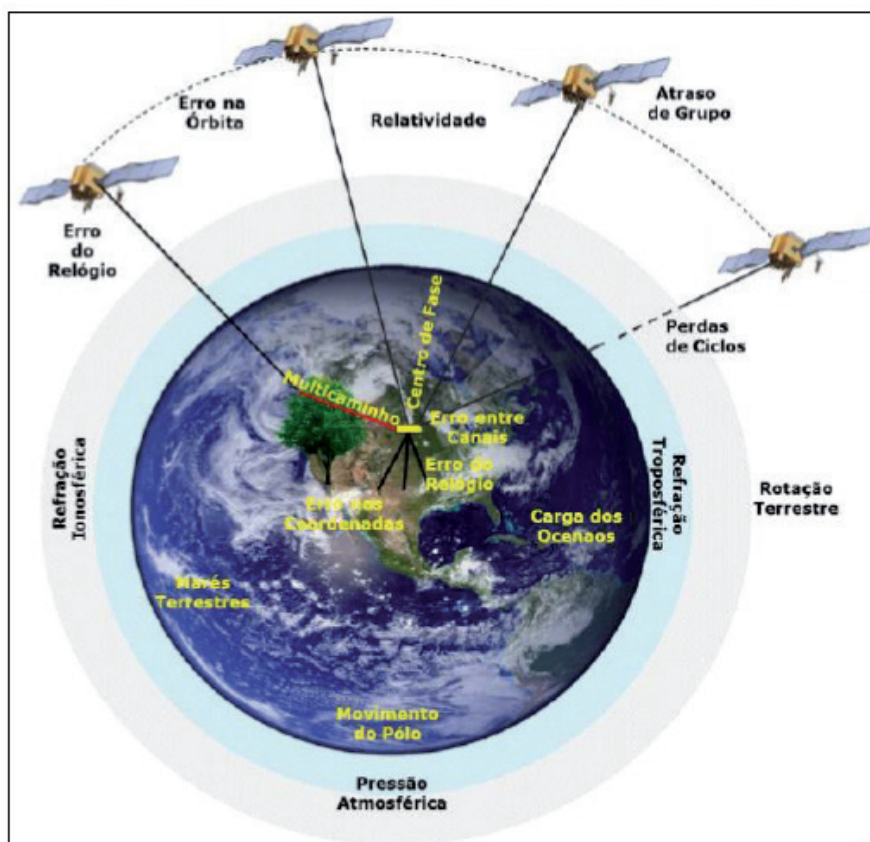


Figura 3.1 – Efeito dos erros aleatórios (noise), sistemáticos (bias) e grosseiros (blunder) no posicionamento.

Tabela 3.1 – Fontes e efeitos de alguns dos principais erros do posicionamento GNSS.

Fonte	Efeitos
Satélite	Erro orbital
	Erro do relógio do satélite
	Correções relativísticas
	Variação do centro de fase da antena do satélite
Propagação do sinal	Refração ionosférica
	Rotação da Terra
	Refração troposférica
	Perdas de ciclo (sinal)
	Multicaminho
Receptor	Erro do relógio do receptor
	Variação do centro de fase da antena do receptor
	Fase <i>wind-up</i>
	Ruído do receptor
Estação	Erro nas coordenadas de referência
	Marés terrestres
	Cargas oceânicas

**FIGURA 3.2** – Ilustração de algumas fontes de erros no posicionamento GNSS.

3.1. ERRO ORBITAL

A partir das efemérides transmitidas é possível obter a posição (coordenadas) dos satélites em um dado instante. No entanto, estas coordenadas preditas (calculadas) diferem das suas coordenadas “verdadeiras”, devido, principalmente, à incapacidade dessas efemérides de modelar completamente as forças que agem nos satélites, como a força gravitacional da Terra, a atração lunissolar e etc. Essas discrepâncias nos valores das coordenadas dos satélites são denominadas de erros orbitais (Figura 3.3). No posicionamento por ponto, os erros orbitais são propagados diretamente para a posição do usuário. Entretanto, se, ao invés das efemérides transmitidas, forem utilizadas efemérides precisas, o erro orbital é reduzido significativamente.

No posicionamento relativo, isto é, envolvendo dois ou mais receptores, como regra prática, o erro orbital na determinação de uma linha-base (distância relativa entre dois receptores) pode ser obtido de acordo com a seguinte expressão:

$$\Delta b = b \frac{\Delta r}{r}$$

Onde Δb é o erro resultante na linha-base, b é o comprimento da linha-base, Δr é o erro na posição do satélite (erro orbital), r é a distância do satélite ao receptor (aproximadamente 20.000 km). Como o erro orbital varia de poucos metros, utilizando efemérides transmitidas, até poucos centímetros, utilizando efemérides precisas, a Tabela 2.2 apresenta alguns valores para Δb , considerando $r = 20.000$ km.

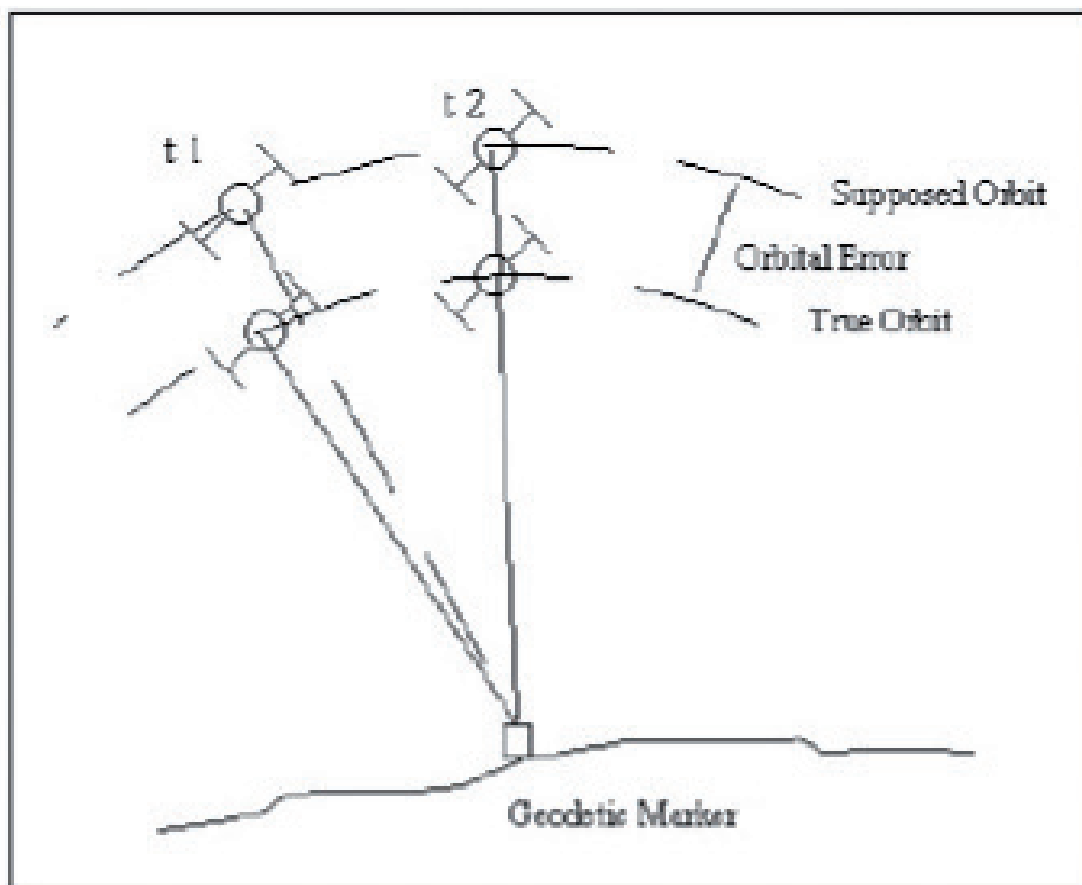


Figura 3.3 – Erro orbital de um satélite em dois instantes de tempo distintos t1 e t2.

Tabela 3.2 – Valores para o erro resultante na linha-base (Δb em mm), em função do comprimento da linha-base (b em km, linhas à esquerda) e do erro orbital (Δr em m, colunas acima), considerando $r = 2000$ km.

	0,01	0,02	0,05	0,1	0,5	1	2	5
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,3
5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,3	0,5	1,3
10	0,0	0,0	0,0	0,1	0,3	0,5	1,0	2,5
20	0,0	0,0	0,1	0,1	0,5	1,0	2,0	5,0
50	0,0	0,1	0,1	0,3	1,3	2,5	5,0	12,5
100	0,1	0,1	0,3	0,5	2,5	5,0	10,0	25,0
150	0,1	0,2	0,4	0,8	3,8	7,5	15,0	37,5
200	0,1	0,2	0,5	1,0	5,0	10,0	20,0	50,0
300	0,2	0,3	0,8	1,5	7,5	15,0	30,0	75,0
400	0,2	0,4	1,0	2,0	10,0	20,0	40,0	100,0
500	0,3	0,5	1,3	2,5	12,5	25,0	50,0	125,0

3.2. ERRO DO RELÓGIO DO SATÉLITE

Os satélites GNSS possuem relógios atômicos, isto é, altamente precisos, entretanto, no caso do GPS, por exemplo, os mesmos não estão perfeitamente sincronizados com o tempo oficial GPS, ditado por um relógio atômico de uma estação de controle terrestre localizada nos EUA. A diferença entre o tempo GPS, ditado por este relógio atômico localizado nos EUA, e o tempo de um satélite GPS, ditado por seu relógio atômico, é pequena, de no máximo 1 milissegundo. Entretanto, como os sinais GNSS se propagam na velocidade da luz, pois são ondas de rádio, este erro pode resultar em uma grande diferença no valor das distâncias medidas, pois em 1 milissegundo, por exemplo, a luz percorre 300 km.

Com o uso das efemérides transmitidas, o erro do relógio do satélite, em geral, é calculado com o uso de um polinômio de grau 2. Com o uso das efemérides precisas, o erro do relógio do satélite já é calculado e fornecido para intervalos de tempo de 15 minutos. No método de posicionamento relativo, o erro do relógio do satélite é cancelado, considerando que o mesmo erro, relativo ao relógio de um satélite, afeta igualmente as medidas de distância entre este satélite e os dois receptores envolvidos. O erro do relógio do receptor, que será visto adiante, também é eliminado no posicionamento relativo, a partir do mesmo princípio.

3.3. CORREÇÕES RELATIVÍSTICAS

Os satélites GNSS se encontram a cerca de 20.000 km (órbita média inclinada) ou 36.000 km de altitude (órbita geoestacionária). Isto faz com que os satélites estejam sujeitos a um campo gravitacional muito mais fraco do que o campo gravitacional dos receptores GNSS localizados na superfície terrestre. Além disso, os satélites em órbita média inclinada percorrem cerca de 3,9 km/s enquanto os satélites em órbita geoestacionária percorrem cerca de 3,07 km/s. Isto faz com que os satélites possuam uma velocidade tangencial maior que corpos situados na superfície terrestre, cuja velocidade tangencial de rotação é cerca de 465 m/s no Equador. Como o tempo passa mais devagar para corpos sujeitos a menor campo gravitacional, porém, passa mais rápido para corpos sujeitos a maior velocidade, correções relativísticas, isto é, considerando a Teoria da Relatividade de Einstein devem ser aplicadas no posicionamento GNSS (Figura 3.4).

Tais correções são feitas no relógio dos satélites, pois, no caso do GPS, por exemplo, antes de serem lançados, a frequência nominal dos relógios dos satélites é reduzida em 0,00455 Hz, caso contrário, não seria possível realizar

um posicionamento de alta precisão utilizando sistemas GNSS. Além disso, efeitos relativísticos residuais podem ser corrigidos no processamento dos dados ou minimizados no método de posicionamento relativo.

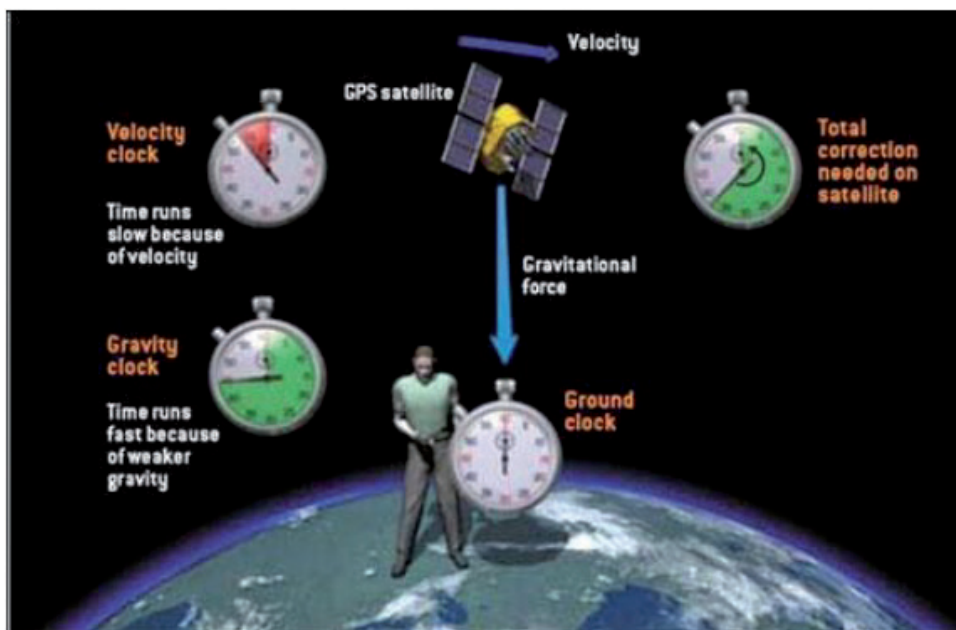


Figura 3.4 – Questões envolvidas nas correções relativísticas no posicionamento por GNSS.

3.4. ROTAÇÃO DA TERRA

O cálculo das coordenadas do satélite deve ser feito para o instante de transmissão do sinal e em um sistema de coordenadas fixo à Terra, isto é, um sistema de referência terrestre, como por exemplo, WGS-84 G1762, PZ-90.11, GTRF14v01 e etc. Dessa forma, torna-se necessário efetuar a correção do movimento de rotação da Terra, pois, durante a propagação do sinal, o sistema de coordenadas terrestre rotaciona com relação ao satélite, alterando assim as suas coordenadas. As coordenadas originais do satélite, obtidas nas efemérides transmitidas, devem ser rotacionadas sobre o Eixo Z de um ângulo α , definido como o produto do tempo de propagação (t) pela velocidade angular de rotação da Terra (ω). Como o tempo de propagação do sinal é da ordem de $t = 0,067$ s, e a velocidade angular de rotação da Terra é da ordem de $\omega = 7,22 \cdot 10^{-5}$ rad/s, a correção a ser aplicada para as coordenadas X,Y do satélite é da ordem de 100 metros, considerando uma altitude da órbita de 20.000 km.

3.5. ERRO DEVIDO A IONOSFERA

A atmosfera terrestre pode ser dividida de várias formas, em relação à temperatura, ionização, campo magnético, propagação de ondas e etc. Com relação à propagação de ondas, a atmosfera é dividida em:

- Troposfera: Superfície até ~50 km; partículas neutras (não ionizadas); propagação do sinal depende da pressão do ar, do vapor d'água e da temperatura, e provoca o mesmo erro independente da frequência do sinal, isto é, meio não dispersivo (para sinais abaixo de 30GHz).
- Ionosfera: Situada entre 50 km–1000 km; partículas ionizadas; propagação do sinal depende da frequência do sinal e da densidade de elétrons livres.

Atualmente, a ionosfera é a maior fonte potencial de erro no posicionamento GNSS. O erro devido à ionosfera depende do conteúdo total de elétrons livres (TEC – *Total Electron Content*) da ionosfera, e também da frequência da onda eletromagnética que a atravessa, sendo que o sinal dos satélites GNSS contém pelo menos duas, por exemplo, L1 e L2 (Figura 3.12). O TEC varia no tempo e no espaço e é influenciado por diver-

das variáveis, tais como: ciclo solar, época do ano, hora do dia, localização geográfica, atividade geomagnética, dentre outros. A região brasileira é um dos locais que apresentam os maiores valores e variações espaciais do TEC e onde estão presentes diversas particularidades da ionosfera, tais como a anomalia equatorial e o efeito da cintilação ionosférica.

Em termos gerais, sobre as variações diurnas, no Brasil, o valor máximo do TEC ocorre entre as 15h e as 19h. Sobre as variações sazonais, nos equinócios os valores do TEC são maiores enquanto nos solstícios os valores do TEC são menores. Sobre as variações de longo período, o Sol apresenta ciclos de atividade solar com duração de cerca de 11 anos. Atualmente, estamos no ciclo solar 24, iniciado em Janeiro de 2008 e que deverá ser o ciclo solar de menor atividade solar registrada desde que os registros precisos se iniciaram, em 1750.

Sobre a localização geográfica, em geral, a região equatorial é onde ocorre os maiores valores e as maiores variações do TEC, as regiões de médias latitudes são relativamente livres de anomalias ionosféricas, enquanto as regiões polares apresentam um padrão imprevisível. Na região equatorial ocorre o efeito fonte, resultando nas anomalias equatoriais, especialmente para as regiões entre 10º e 20º de latitude geomagnética. A anomalia equatorial apresenta dois picos por dia, um por volta das 14h local e outro por volta da meia-noite local.

Além disso, devido a formação de bolhas ionosféricas, pode ocorrer ainda o efeito de cintilação ionosférica, que enfraquece os sinais GNSS, podendo até mesmo resultar em perdas de sinal. As bolhas ionosféricas se formam após o pôr do sol, especialmente nas regiões equatoriais ou de altas latitudes. Pode-se obter informações quase em tempo real sobre a ocorrência de cintilações ionosféricas no seguinte endereço eletrônico: <ftp://ftp.cls.fr/pub/scintillations/>. Finalmente, explosão solares podem afetar o campo geomagnético da Terra, resultando em tempestades geomagnéticas que degradam significativamente a qualidade do posicionamento GNSS, não sendo recomendado realizar o posicionamento GNSS sob estas circunstâncias.

A dependência do erro da ionosfera com relação à frequência da onda portadora torna possível eliminar o erro de primeira ordem da ionosfera. Para isso, é necessário dispor de receptor GNSS de dupla ou tripla frequência. Ou seja, usuários de receptores de dupla ou tripla frequência tem a capacidade de praticamente eliminar o erro da ionosfera, a partir de uma combinação linear entre as pseudodistâncias ou entre as fases, denominada combinação ion-free (designada por L0 ou L3, ver a Tabela 3.3).

Tabela 3.3 – Erro máximo esperado devido à ionosfera para medidas de distâncias na direção vertical.

Frequência	1ª ordem	2ª ordem	3ª ordem
L1	32,5 m	0,036 m	0,002 m
L2	53,5 m	0,076 m	0,007 m
L0 (<i>ion-free</i>)	0,0 m	0,026 m	0,006 m

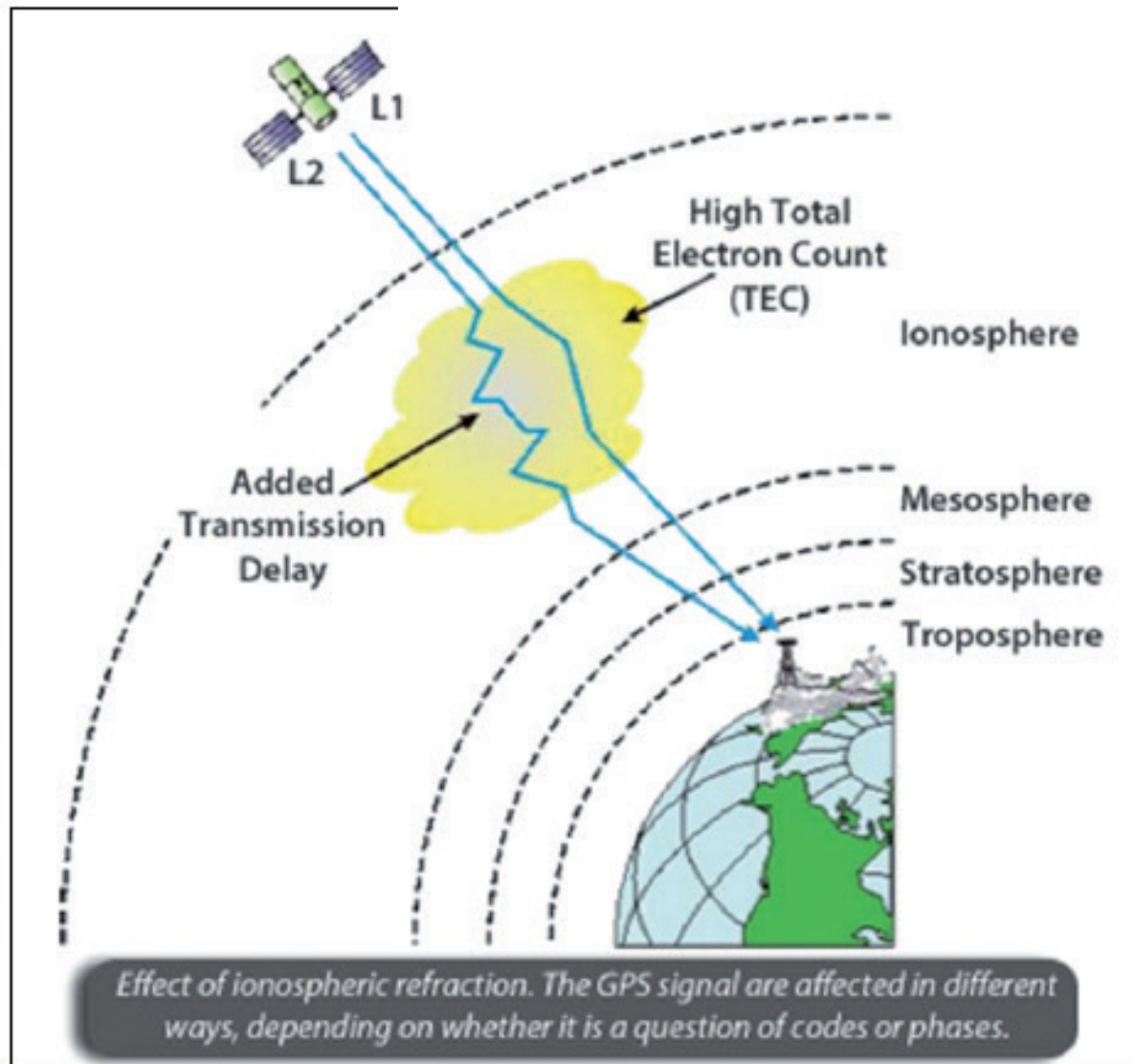


Figura 3.12 – Ilustração da variação do erro devido a ionosfera nas portadoras L1 e L2 em função do TEC.

Para usuários que não dispõem de receptores de dupla ou tripla frequência, existem algumas possibilidades de minimização do erro devido à ionosfera, como por exemplo, no posicionamento relativo, pois se considera que o comportamento da ionosfera (TEC) nos dois locais é praticamente o mesmo. Logo, na diferenciação entre as observáveis o erro devido à ionosfera é minimizado. Nota-se que existe então uma limitação devido à distância de separação entre os dois receptores, pois, quanto maior o distanciamento, menos correlacionado é o erro devido à ionosfera nos dois locais. É importante salientar que para receptores de dupla ou tripla frequência a linha-base pode ser extensa, por exemplo, 400 km ou até mais, pois o erro da ionosfera é eliminado localmente em cada receptor, com o uso da observável *ion-free*. A Literatura costuma citar que o distanciamento máximo entre os receptores de simples frequência é de até 20 km, sendo denominado de linha-base curta. Entretanto, como o erro devido a ionosfera depende de diversos fatores, dependendo das condições, esta distância pode ser maior.

Pode-se ainda minimizar o erro devido à ionosfera em receptores de simples frequência corrigindo as observáveis GNSS por meio do cálculo do erro utilizando algum modelo da ionosfera. Esses modelos permitem calcular o valor do erro devido à ionosfera para corrigir as observáveis originais, sendo que esses modelos não conseguem eliminar 100% do erro. Os coeficientes do Modelo de Klobuchar são transmitidos nas mensagens de navegação (efemérides transmitidas) do GPS, o que permite calcular o erro da ionosfera para um dado instante e localização, sendo que este modelo consegue corrigir entre 50% e 60% do erro devido à ionosfera.

Com a modernização dos sistemas GNSS, com a inclusão da terceira portadora L5 no GPS e a integração de diferentes sistemas GNSS, espera-se melhoras na solução da ambiguidade e do erro devido a ionosfera no posicionamento GNSS. A combinação linear ion-free (L0) mais utilizada para a pseudodistância e para a fase da onda portadora são dadas respectivamente por:

$$PD_{IF} = PD_{L1} - \frac{f_{L2}^2}{f_{L1}^2} PD_{L2}, \quad \varphi_{IF} = \frac{f_{L1}^2}{(f_{L1}^2 - f_{L2}^2)} \varphi_{L1} - \frac{f_{L1} \cdot f_{L2}}{(f_{L1}^2 - f_{L2}^2)} \varphi_{L2}$$

onde: PD_{IF} , PD_{L1} , PD_{L2} são, respectivamente, as pseudodistâncias para L0, L1 e L2, f_{L1} e f_{L2} são, respectivamente, as frequências das portadoras L1 e L2, e φ_{IF} , φ_{L1} e φ_{L2} são, respectivamente, as fases de L0, L1 e L2. A L0 apresenta o mesmo comprimento de onda da portadora L1, porém, por ser uma combinação linear envolvendo tanto L1 quanto L2, possui ruído (desvio-padrão) cerca de 3 vezes maior, não sendo utilizada em linhas-base curtas, onde os efeitos da ionosfera são praticamente cancelados no posicionamento relativo.

Na etapa de planejamento do levantamento GNSS, é possível consultar mapas da ionosfera para verificar como estará o comportamento da ionosfera em determinada localização e em determinado horário. Existem vários serviços que disponibilizam mapas da ionosfera on-line, como por exemplo, o da NASA, disponível em http://iono.jpl.nasa.gov/latest_rti_global.html, e o do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), disponível em <http://www.inpe.br/scintec/pt/realtimeTec.php>. Como regra prática para consulta a estes mapas, o valor de TEC = 1 corresponde a um erro de cerca de 16 cm nas distâncias advindas da portadora L1, tanto para a fase (efeito de -16 cm) quanto para a pseudodistância (efeito de +16 cm).

3.6. ERRO DEVIDO A TROPOSFERA

O efeito (erro) da troposfera no posicionamento por GNSS, também conhecido como atraso troposférico, pode variar de poucos metros até aproximadamente 30 m, e depende da densidade da atmosfera e do ângulo de elevação do satélite no horizonte, pois, quanto mais próximo do horizonte, maior é o percurso do sinal percorrido na troposfera. Para reduzir o erro da troposfera em função do ângulo de elevação do satélite, pode-se utilizar as chamadas máscaras de elevação, recomendadas pela literatura usualmente entre 10° ou 15° (Figura 3.10). No caso, sinais dos satélites GNSS que se encontram abaixo da máscara de elevação são desconsiderados na determinação do posicionamento. O valor da máscara de elevação também pode ser definido após o levantamento GNSS, na etapa de processamento dos dados.

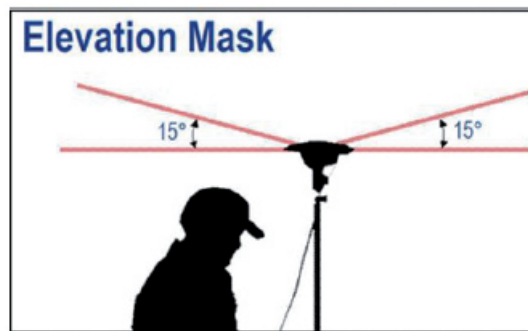


Figura 3.10 – Máscara de elevação para atenuar os efeitos da troposfera na propagação do sinal.

Duas componentes são responsáveis pelo efeito da refração troposférica: uma composta de gases secos (componente hidrostática) e outra composta de vapor d' água (componente úmida). A componente hidrostática (gases secos) depende da quantidade de nitrogênio e oxigênio, sendo que o atraso (erro) corresponde a cerca de 2,3 m no zênite e varia com a temperatura e a pressão atmosférica local. Este atraso é predito com razoável precisão, e a variação é pequena, cerca de 1% durante várias horas. A componente úmida (vapor d'água) depende da umidade do ar, sendo que o atraso (erro) varia de 1 a 30 cm no zênite, entretanto, a variação em função do tempo é muito maior, cerca de 20% em poucas horas, o que torna muito difícil a predição com alta exatidão.

O atraso troposférico (erro total) pode ser aproximado como a soma dos efeitos das componentes hidrostática e úmida (Figura 3.11). O atraso troposférico pode ser devidamente minimizado com o emprego de algum modelo da troposfera, sendo o mais conhecido o modelo de Hopfield. Analisando a Figura 3.11, nota-se que a componente seca corresponde a cerca de 90% do erro total. Em outras palavras, o fato de estar chovendo ou não em pouco interfere na qualidade do posicionamento GNSS. Geralmente, cada uma das componentes é expressa como o produto do atraso zenital (vertical) com uma função de mapeamento, a qual relaciona o atraso vertical no zênite (erro mínimo) com o atraso para outros ângulos de elevação (E), conforme a expressão abaixo:

$$T_r^s = [T_{ZH} \cdot mh(E) + T_{ZW} \cdot mh(E)]$$

onde T_r^s é o atraso troposférico total, T_{ZH} e T_{ZW} são, respectivamente, o atraso troposférico no zênite ($E = 90^\circ$) para a componente seca e para a componente úmida, $mh(E)$ e $mh(E)$ são, respectivamente, as funções de mapeamento que relacionam o atraso zenital das componentes seca e úmida com o ângulo de elevação (E) do satélite.

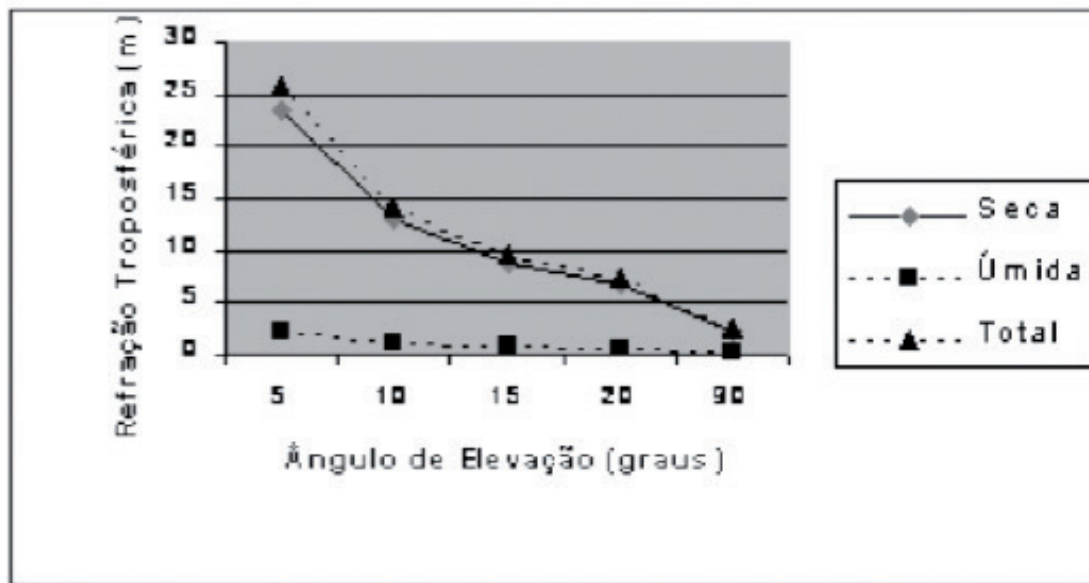


Figura 3.11 – Atraso troposférico total e devido as componentes seca e úmida em função do ângulo de elevação.

Na etapa de planejamento do levantamento GNSS, uma estimativa do atraso troposférico zenital fornecida pelo INPE para determinada localização em determinado horário pode ser obtida no seguinte endereço eletrônico: <http://satelite.cptec.inpe.br/htmldocs/ztd/zenital.htm>.

3.7. PERDAS DE CICLO (SINAL)

Quando um receptor GNSS é inicializado, a parte fracionária da fase da onda portadora é medida e um contador de ciclos inteiros é iniciado. Assim sendo, em um determinado instante, a fase observada será igual à soma da parte fracionária medida naquele instante com o número inteiro de ciclos contados desde o início do rastreamento. O número de ciclos inteiros entre o satélite e o receptor é desconhecido no início do levantamento e esse número de ciclos inteiros é denominado ambiguidade. Se não ocorrer interrupção da contagem no número de ciclos durante o período de observação, ele permanece constante durante todo período de rastreamento.

Porém, podem ocorrer obstruções do sinal de um ou mais satélites, impedindo que estes sinais cheguem até a antena do receptor. Logo, podem haver perdas de sinal, resultando em uma perda na contagem do número inteiro de ciclos medidos no receptor. Esse evento é denominado perdas de ciclo. As causas não estão restritas somente ao bloqueio do sinal cujas obstruções podem ser construções, árvores, pontes, túneis e etc., por exemplo, variações

bruscas na ionosfera ou interferência de outras fontes de rádio podem provocar perdas do sinal. A perda do sinal pode durar somente uma época, bem como, várias épocas. Quando o sinal do satélite GNSS volta a ser rastreado, a fase é novamente medida, porém, houve a perda da contagem de um número “X” de ciclos inteiros de onda, ocasionando problemas para a solução da ambiguidade.

Portanto, é necessário em um pré-processamento identificar quando ocorreram perdas de ciclo, e, além disso, tentar quantificar quantos ciclos. Já existem métodos desenvolvidos para isso, por exemplo, usando as triplas diferenças (conforme será visto no capítulo 7). Em muitos casos, principalmente em posicionamento estático de longa duração (mais comum em levantamentos geodésicos), simplesmente é introduzido um novo conjunto de ambiguidades como incógnitas a serem estimadas no processo. A perda de ciclo afeta a solução da ambiguidade da fase da onda portadora, porém, não é tão crítica para o posicionamento utilizando a pseudodistância advinda do código (Figura 3.8).

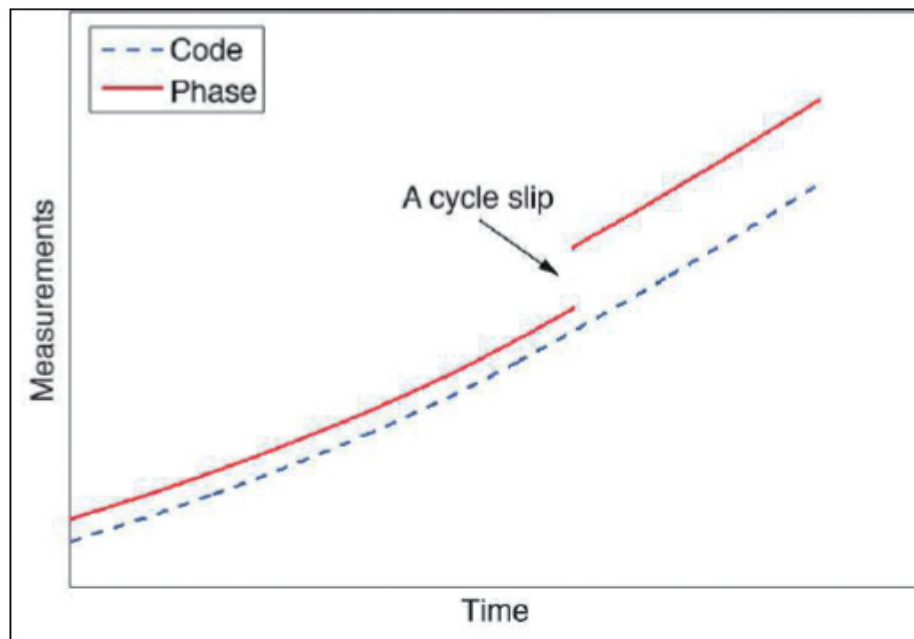


Figura 3.8 – Efeito da perda de ciclo nas medições com a fase da onda portadora e pseudodistância do código.

3.8. ERRO DO MULTICAMINHO

O multicaminho ocorre quando a antena do receptor recebe, além do sinal direto do satélite, sinais refletidos por superfícies e objetos localizados nas proximidades da antena, como construções, árvores, muros, automóveis, postes, taludes, corpos d'água, o próprio solo e etc. (Figura 3.5).

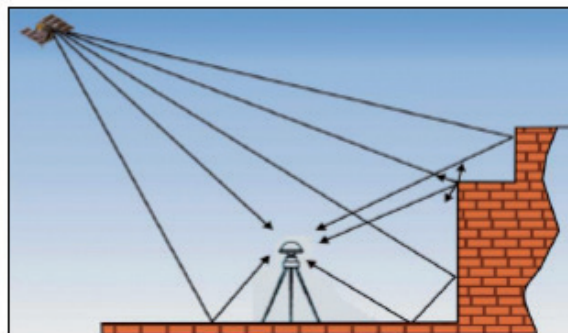


Figura 3.5 – Erro do multicaminho (sinais refletidos).

Para evitar ou reduzir o multicaminho, deve ser evitada a presença de superfícies refletoras nas proximidades da antena receptora do sinal GNSS, embora muitas vezes isso não seja possível, como por exemplo, no caso de levantamentos em áreas urbanas. Outra alternativa é utilizar antenas apropriadas, como por exemplo, antenas *choke-ring* (Figura 3.6) ou antenas pinwheel, ou ainda múltiplas antenas, embora isto encareça os custos e muitas vezes não seja viável do ponto de vista prático. Uma maneira mais prática de reduzir o efeito do multicaminho é por meio da adoção de máscaras de elevação, semelhante ao erro devido a troposfera.

Estudos mostram que o erro máximo do multicaminho é de aproximadamente $\frac{1}{4}$ do comprimento de onda, ou seja, depende da frequência do sinal, sendo de aproximadamente 5 cm para a portadora L1 do GPS. Para as pseudodistâncias advindas do código, o erro do multicaminho pode chegar até 2m. A observável *ion-free* se comporta de maneira muito complicada quando sujeita ao efeito do multicaminho. Atualmente, o multicaminho é o erro de modelagem mais complexa, pois depende da geometria do posicionamento e das condições locais de rastreo. Embora o multicaminho depende da geometria e das condições do levantamento GNSS, sendo muito difícil de modelar o seu efeito, uma estimativa para o erro do multicaminho para as pseudodistâncias em L1 e L2 é dada por:

$$MC_{L1} = PD_{L1} - \left(1 + \frac{2}{(f_1/f_2)^2 - 1}\right) \varphi_{L1} + \left(\frac{2}{(f_1/f_2)^2 - 1}\right) \varphi_{L2}$$

$$MC_{L2} = PD_{L2} - \left(\frac{2 \cdot (f_1/f_2)^2}{(f_1/f_2)^2 - 1}\right) \varphi_{L1} + \left(\frac{2}{(f_1/f_2)^2 - 1}\right) \varphi_{L2}$$

onde MC_{L1} e MC_{L2} são os erros estimados do multicaminho para as pseudodistâncias em L1 e L2, respectivamente, PD_{L1} e PD_{L2} são os valores das pseudodistâncias em L1 e L2, respectivamente, φ_{L1} e φ_{L2} são os valores das fases da onda portadora em L1 e L2, respectivamente, e f_1 e f_2 são as frequências das portadoras L1 e L2, respectivamente. O *software* TEQC permite obter, dentre outros parâmetros, os valores de MC_{L1} e MC_{L2} .



Figura 3.6 – Exemplo de antena *choke-ring*.

3.9. ERRO DO RELÓGIO DO RECEPTOR

Os receptores GNSS possuem relógios de quartzo, isto é, menos precisos, porém, de custo mais baixo, e, portanto, os mesmos não estão perfeitamente sincronizados com o tempo oficial GPS, ditado por um relógio atômico de uma estação de controle terrestre localizada nos EUA. Além disso, o erro do relógio de um receptor, que utiliza um oscilador de quartzo, é diferente do erro do relógio de um satélite, que utiliza um oscilador atômico. Entretanto, o erro do relógio do receptor pode ser estimado no posicionamento por ponto, bastando para isso adicionar uma incógnita ao modelo matemático, resultando em quatro incógnitas (posição 3D do ponto – X, Y, Z, mais o erro do relógio do receptor – dtr). Este é o motivo pelo qual os sistemas GNSS são projetados para que, em estágio plenamente operacional, pelo menos quatro satélites estejam visíveis para qualquer observador em qualquer instante. Além disso, considerando que o erro do relógio do receptor afeta igualmente as medidas de distância entre este receptor e dois satélites, o erro do relógio do receptor é cancelado no método de posicionamento relativo, conforme será visto no capítulo 7.

3.10. CENTRO DE FASE DA ANTENA

O centro de fase eletrônico da antena do receptor é o ponto no qual as medidas dos sinais são referenciadas, e geralmente não coincide com o centro geométrico da antena. A diferença varia de acordo com a intensidade e direção dos sinais, e ainda com a frequência da onda portadora (L1, L2, L5 e etc.). Um modo prático para minimizar os efeitos da variação do centro de fase da antena no posicionamento relativo consiste na utilização de receptores com antenas do mesmo fabricante e modelo, desde que todos receptores envolvidos no levantamento tenham suas antenas orientadas na mesma direção, como por exemplo, o norte magnético ou o norte verdadeiro, por atualmente serem de fácil obtenção com o uso de aplicativos de smartphones.

Este é o motivo pelo qual algumas antenas possuem uma marca (“seta”) sobre sua superfície indicando que ela deve ser orientada ao norte magnético. Assim, espera-se que os deslocamentos dos centros de fase das antenas sejam aproximadamente iguais em todas as antenas dos receptores envolvidos, e, desta forma, cancelados no posicionamento relativo. O centro de fase da antena normalmente é tratado no posicionamento de alta precisão, pois a diferença em relação ao ARP (*Antenna Reference Point* – ponto de referência da antena) pode chegar a alguns cm. O ARP e a variação do centro de fase da antena constam no manual da antena. Como o centro de fase da antena varia em função da intensidade e a direção do sinal, pode ser obtido por calibração, sendo que o IGS fornece para alguns modelos (Figura 3.7).

Ressalta-se que o centro de fase da antena do satélite (ponto de referência para a emissão dos sinais), também difere do centro de massa do satélite (ponto de referência para as suas coordenadas), sendo que a correta posição do centro de fase da antena em relação ao centro de massa do satélite é necessária para a determinação das órbitas com alta precisão (efemérides precisas). O IGS também fornece estes valores e suas variações.

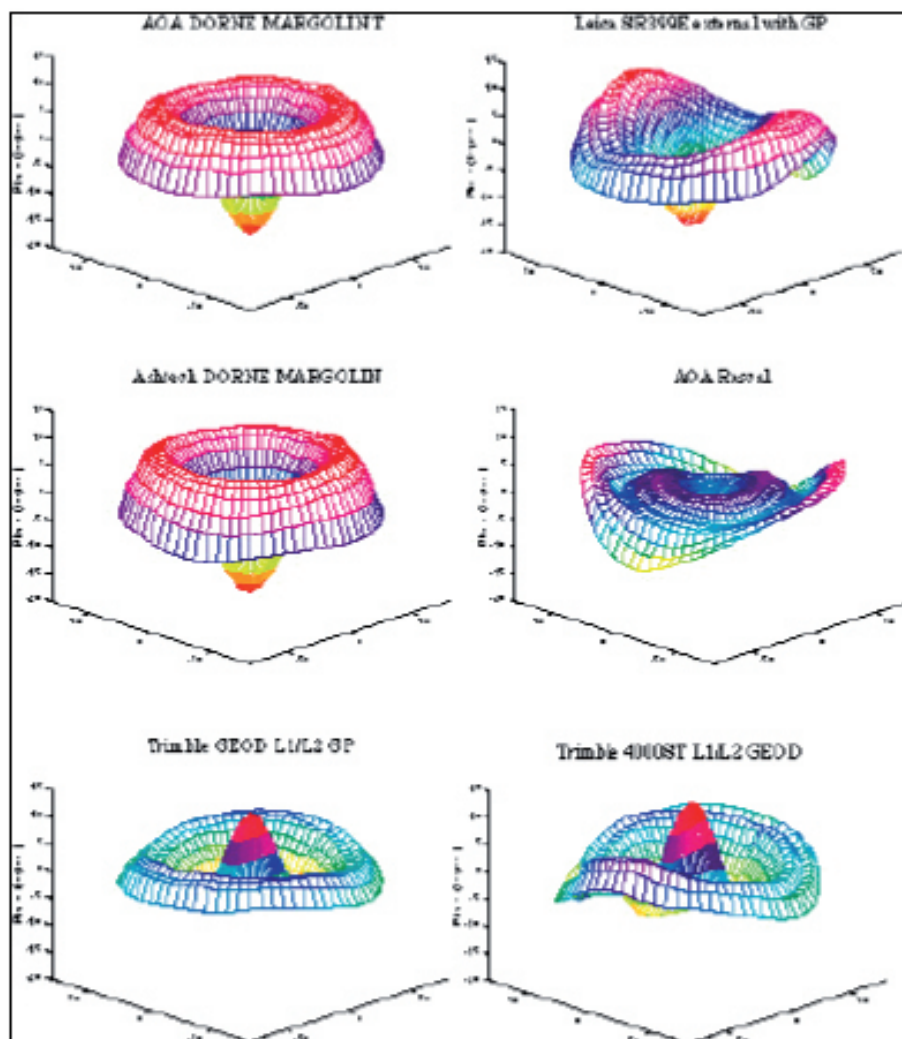


Figura 3.7 – Variação do centro de fase da antena para alguns fabricantes e modelos de antena.

3.11. FASE WIND-UP

A fase de uma antena polarizada circularmente à direita, como no caso da antena dos satélites e receptores GNSS, depende diretamente da orientação da antena com respeito à fonte que gera sinal. Desse modo, a medida de fase depende da orientação relativa entre as antenas que transmitem e recebem o sinal, bem como da direção da linha de visada entre elas. Se houver mudança na orientação da antena receptora, haverá mudança na direção de referência e, em consequência, mudança na fase medida. Da mesma forma, mudando a orientação da antena transmissora, ocorrerá mudança na direção do campo elétrico da mesma, resultando em mudança na fase observada. À medida que uma ou as duas antenas rotacionam, a mudança na observação da fase se acumula, sendo denominada de fase *wind-up*. Em geral, o erro da fase *wind-up* pode alcançar cerca de meio comprimento de onda, ou seja, cerca de 9,5 cm em L1, por exemplo.

Nos levantamentos estáticos procura-se manter a antena do receptor em uma orientação fixa (por exemplo, o norte), e o efeito da fase *wind-up* é negligenciado nos *softwares* comerciais. No posicionamento relativo estático envolvendo linhas-base curtas esse efeito não afeta a solução da ambiguidade, mas isso não é verdade em linhas-base longas, podendo afetar a solução da ambiguidade. No posicionamento relativo em tempo real (RTK) ocorrem valores significativos de erro quando há mudança abrupta da trajetória da antena em levantamentos cinemáticos, e no posicionamento por ponto preciso (PPP), quando deseja-se alta precisão, isto é, poucos mm, este efeito deve ser modelado no *software* de processamento utilizado.

Mesmo que a orientação da antena do receptor não se altere, os satélites GNSS tem seus painéis solares orientados em relação ao Sol, e, desta forma, ocorrem lentas rotações de suas antenas com o passar do tempo, sendo estas rotações mais críticas na ocorrência de eclipses. Nestes casos, o efeito da fase *wind-up* pode rapidamente atingir alguns decímetros.

3.12. ATRASO INSTRUMENTAL NO SATÉLITE E NO RECEPTOR E ERRO ENTRE OS CANAIS DO RECEPTOR

O caminho percorrido pelas diferentes portadoras no *hardware* do satélite e do receptor não é o mesmo, e estas diferenças de caminhos percorridos pelas portadoras no *hardware* do satélite e do receptor resultam no atraso instrumental do satélite e do receptor, respectivamente. No caso dos satélites, durante a calibração na fase de testes, a magnitude do atraso é determinada e introduzida como parte das mensagens de navegação, sendo diferente para cada satélite. O atraso da portadora L2 é cerca de 1,647 vezes maior que o atraso da portadora L1 para um dado satélite GPS, e estes valores são constantemente atualizados por meio do segmento de controle.

No caso dos receptores GNSS, estes valores são obtidos por calibração ou estimados durante o processamento dos dados GNSS. Além disso, em geral, os receptores GNSS possuem múltiplos canais (um para cada satélite), ou seja, os sinais de cada satélite percorrerão caminhos eletrônicos diferentes no *hardware* do receptor. Para corrigi-los, o receptor dispõe de dispositivo que realiza uma calibração no início de cada levantamento GNSS. Efeitos residuais são praticamente eliminados no posicionamento relativo ou podem ainda ser estimados no processamento dos dados para os casos em que se deseja alta precisão.

3.13. ERROS NA ESTAÇÃO GNSS

Finalmente, como erros na própria estação GNSS, isto é, no ponto topográfico ocupado com a antena GNSS, pode-se citar possíveis erros de coordenadas, em função da precisão e exatidão da rede de referência adotada, ou em função da época do levantamento em relação à época de referência da determinação rede, devido principalmente ao movimento de tectônica de placas, e o efeito de marés terrestres, cargas oceânicas e movimento do polo sobre a superfície terrestre do local onde se encontra a estação GNSS. Estes efeitos devem ser considerados no posicionamento de alta precisão, pois a diferença nas coordenadas da estação, considerando a tectônica de placas e/ou a carga dos oceanos e/ou as marés terrestres e/ou o movimento do polo, pode alcançar alguns cm ou até mesmo dm (Figura 3.9). Como exemplo, pode-se citar que a coordenada norte da estação IFSC da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento

Contínuo) está atualmente cerca de 20 cm defasada em relação a sua coordenada oficial homologada pelo IBGE, em função da diferença de tempo de mais de 15 anos em relação a Maio de 2000, ou seja, a época de referência do sistema de referência oficial do Brasil (SIRGAS2000).

No caso do Equador, o efeito das marés terrestres (atração lunissolar) pode provocar um deslocamento da superfície terrestre de até 40 cm em um intervalo de tempo de apenas 6 horas. O movimento do polo pode ocasionar uma variação de até 25 mm na posição da estação GNSS, enquanto a carga oceânica pode resultar em variações de até 10 cm na componente vertical de estações em algumas regiões próximas aos oceanos e até 1 cm para uma estação localizada até 1.000 km dos oceanos. Além desses efeitos, a própria carga da atmosfera pode resultar em variações entre 10 até 25 mm na componente vertical, em função das variações da pressão atmosférica, especialmente na ocorrência de grandes tempestades ou precipitações pluviométricas. Tais efeitos podem ser negligenciados em posicionamentos de baixa ou média precisão ou minimizados no método de posicionamento relativo, mas devem ser considerados no posicionamento por ponto de alta precisão.

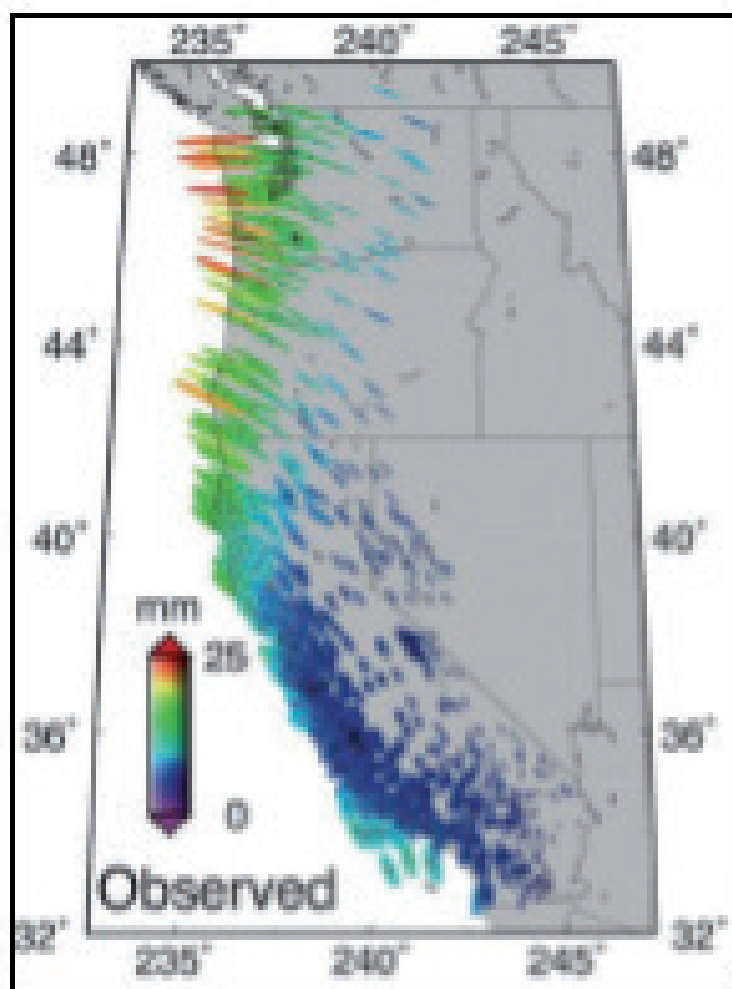


Figura 3.9 – Efeito da carga oceânica sobre a superfície terrestre em uma região da costa oeste dos EUA.

4. Posicionamento por Pontos Simples (PPS)

Posicionamento diz respeito à determinação da posição de objetos em relação a um referencial específico (Figura 4.1). No caso dos sistemas GNSS, o posicionamento pode ser classificado em posicionamento absoluto (ou por ponto), onde as coordenadas estão associadas diretamente ao geocentro (centro de massa da Terra), ao redor do qual os satélites GNSS orbitam; ou posicionamento relativo, quando as coordenadas são determinadas com relação a um

referencial materializado por um ou mais vértices com coordenadas conhecidas, ou ainda DGNS (Differential GNSS – GNSS diferencial), quando o posicionamento de um ponto é determinado com base em correções GNSS estimadas por outros pontos com coordenadas conhecidas.

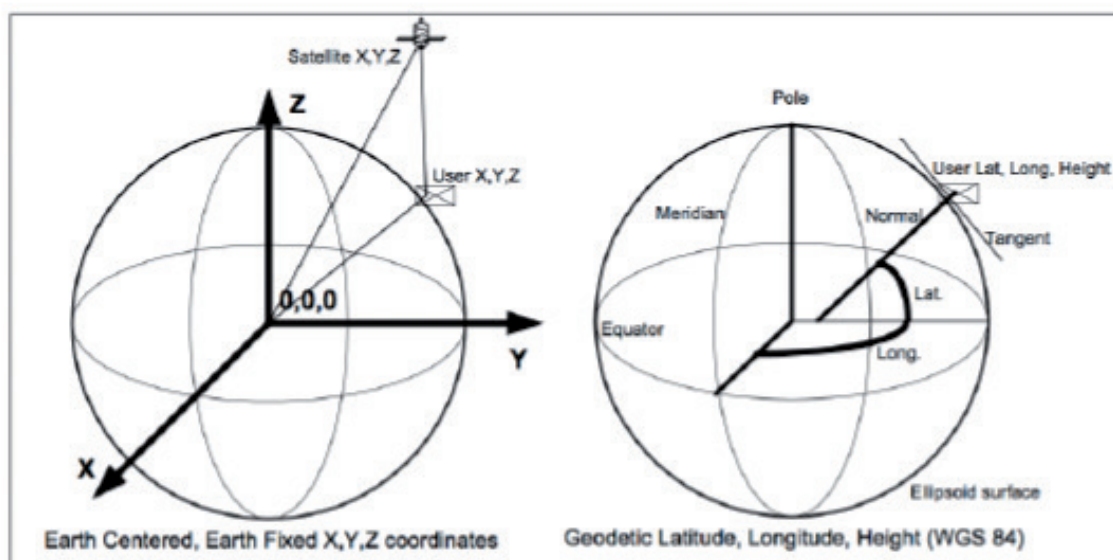


Figura 4.1 – Sistemas de coordenadas envolvidos no posicionamento por GNSS.

O objeto a ser posicionado pode estar em repouso ou em movimento, o que gera um complemento à classificação com respeito ao referencial adotado. No primeiro caso, trata-se do posicionamento estático, enquanto o segundo diz respeito ao posicionamento cinemático.

No posicionamento por ponto ou absoluto, quando se utilizam as efemérides transmitidas, a posição do ponto é determinada no referencial vinculado ao sistema de coordenadas dos satélites, que no caso do GPS, por exemplo, é o WGS-84 G1762, no caso do GLONASS, é o PZ-90.11, no caso do Galileo, é o GTRF14v01 e etc. Quando são utilizadas as efemérides precisas, tem-se o Posicionamento por Ponto Preciso (PPP). Nesse caso, o referencial do ponto será o ITRF vigente (atualmente ITRF2014).

No posicionamento relativo, a posição de um ponto é determinada com relação à de outro(s), cujas coordenadas são conhecidas. As coordenadas do(s) ponto(s) conhecido(s) devem estar referenciadas ao referencial adotado, por exemplo, WGS-84 G1762, ou em um sistema compatível com esse, por exemplo, SIRGAS2000, ITRF2008, ITRF2014. Nesse caso, os elementos que compõem a linha-base, ou seja, ΔX , ΔY e ΔZ , são estimados no posicionamento e, ao serem acrescentados às coordenadas conhecidas da estação base, proporcionam as coordenadas da estação desejada. No DGNS, um receptor GNSS é posicionado em uma estação de referência. Diferenças são calculadas na estação de referência, seja entre as coordenadas estimadas (empregando o posicionamento por ponto simples) e as coordenadas conhecidas desta estação de referência, seja entre as pseudodistâncias observadas e as determinadas a partir das posições dos satélites e da posição conhecida da estação de referência, isto é, a distância geométrica “verdadeira”. No primeiro caso, as discrepâncias em coordenadas são transmitidas para a estação móvel; esta realiza o posicionamento por ponto e aplica a correção transmitida às suas coordenadas. No segundo caso, as correções das pseudodistâncias são transmitidas à estação móvel, o qual realiza as correções das pseudodistâncias relativas aos mesmos satélites, e, posteriormente, realiza o posicionamento por ponto.

O método DGNS foi desenvolvido para que fossem reduzidos os efeitos advindos da técnica SA. Embora também se empregue dois ou mais receptores, o conceito do DGNS é diferente do posicionamento relativo. Enquanto no DGNS, aplicam-se correções estimadas na estação base nas coordenadas ou pseudodistâncias da estação móvel, que realiza posteriormente o posicionamento por ponto; no método relativo se determina um vetor (linha-base) ligando as duas estações e o modelo matemático é de equações de simples ou duplas diferenças, conforme será visto posteriormente.

Independente do método, o posicionamento pode ser em tempo real ou pós-processado. Dessa forma, temos, por exemplo, posicionamento por ponto em tempo real, posicionamento por ponto pós-processado, posicionamento relativo estático, posicionamento relativo cinemático, DGNSS cinemático, DGNSS em tempo real e etc.

No Posicionamento por Ponto Simples (PPS), necessita-se de apenas um receptor GNSS. É normalmente empregado em navegação de baixa precisão e levantamentos expeditos, com receptores de navegação. A observável utilizada é a pseudodistância advinda do código C/A. Quando a técnica SA estava ativa (até Maio de 2000), a acurácia planimétrica era de aproximadamente 100 m, com 95% de probabilidade. Com a desativação, melhorou quase 10 vezes, ficando em torno de 13 m, com 95% de probabilidade. É importante ressaltar que o PPS é o método de posicionamento utilizado nos smartphones, GPS de automóveis e receptores GNSS de baixo custo em geral. As etapas envolvidas no PPS são:

- 1) Calcular o instante de recepção do sinal, em função dos segundos da semana desde o início da semana GPS que ele pertence até o dia que foram gerados os dados de observação, em horas (H), minutos (M) e segundos (S);
- 2) Para cada satélite, calcular o instante de transmissão do sinal GNSS em função do instante de recepção do mesmo;
- 3) Calcular o erro do relógio dos satélites com boa aproximação, com base nos coeficientes dos polinômios de grau 2 contidos nas efemérides transmitidas;
- 4) Calcular as coordenadas cartesianas geocêntricas (X,Y,Z) dos satélites para cada instante de transmissão do sinal, por meio dos elementos keplerianos e perturbadores da órbita contidos nas efemérides transmitidas;
- 5) Corrigir as coordenadas cartesianas geocêntricas (X,Y,Z) dos satélites do movimento de rotação da Terra, pois, durante a propagação do sinal, o sistema de coordenadas terrestre (WGS-84 G1762, PZ-90.11, GTRF14v01 e etc.) rotaciona em relação ao satélite, alterando assim as suas coordenadas (X,Y,Z).
- 6) Calculadas e corrigidas as coordenadas dos satélites para os instantes de transmissão dos sinais, realiza-se o ajustamento pelo método dos mínimos quadrados (MMQ) para determinar as coordenadas cartesianas geocêntricas da estação. Geralmente, é utilizado o método paramétrico de ajustamento.

No caso, para cada satélite, forma-se uma equação de pseudodistância (PD_r^s):

$$PD_r^s = \sqrt{(X^s - X_r)^2 + (Y^s - Y_r)^2 + (Z^s - Z_r)^2} + c(dt_r - dt^s) + \varepsilon_{PD}$$

onde X^s , Y^s , Z^s são as coordenadas do satélite, obtidas em função das efemérides transmitidas, X_r , Y_r , Z_r são as coordenadas do receptor, isto é, os valores desconhecidos a se determinar, c é a velocidade da luz (constante), dt^s é o erro do relógio do satélite, obtido em função das efemérides transmitidas, dt_r é o erro do relógio do receptor, isto é, outro valor desconhecido a se determinar, e ε_{PD} são os demais erros envolvidos, negligenciados no PPS. Para um mesmo instante, tendo quatro pseudodistâncias, ou seja, rastreando quatro satélites visíveis (Figura 4.2), é possível obter uma solução única e exata para as quatro incógnitas do posicionamento (X_r , Y_r , Z_r e dt_r). Rastreando cinco ou mais satélites visíveis, para cada instante, é possível fazer um ajustamento pelo método dos mínimos quadrados para determinar as quatro incógnitas do posicionamento.

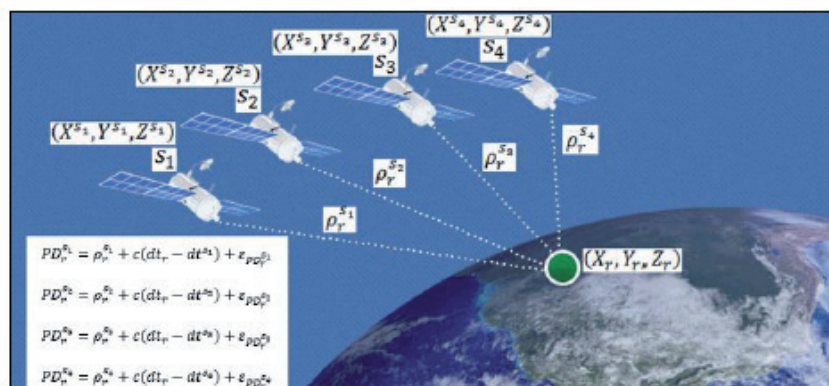


Figura 4.2 – Exemplo de posicionamento por ponto simples rastreando quatro satélites.

Os únicos erros considerados no PPS são o erro do relógio do satélite, as correções relativísticas, a rotação da Terra, o erro do relógio do receptor e o erro devido a ionosfera, que é parcialmente corrigido com o uso do Modelo global de Klobuchar, cujos coeficientes também são fornecidos nas efemérides transmitidas, o que permite corrigir entre 50% e 60% deste erro. Todos os demais erros (multicaminho, refração troposérica, erro orbital e etc.) são negligenciados, o que faz com que o PPS apresente precisão e exatidão (acurácia) da ordem de metros ou dezenas de metros. O PPS pós-processado pode ser realizado gratuitamente no seguinte endereço eletrônico: <http://www.fct.unesp.br/#!/pesquisa/grupos-de-estudo-e-pesquisa/gege/pps-on-line/pps-on-line/>. A Tabela 4.1 apresenta um resumo do PPS.

Tabela 4.1 – Resumo do método de posicionamento por ponto simples.

Observáveis utilizadas:	Pseudodistâncias advindas dos códigos (C/A, P ou Y, L2C e etc.)
Erros corrigidos:	Erro do relógio do satélite, Relatividade e rotação da Terra
Erros parcialmente corrigidos:	Ionosfera (Modelo de Klobuchar)
Erros minimizados:	Nenhum
Erros estimados:	Erro do relógio do receptor
Erros eliminados/cancelados:	Nenhum
Erros negligenciados:	Todos os demais
Precisão esperada:	Da ordem de metros
Finalidade:	Navegação expedita

5. GNSS Diferencial (DGNSS)

O DGNSS (Differential GNSS – GNSS diferencial) foi desenvolvido em razão da necessidade de reduzir os efeitos da técnica SA, sendo inicialmente denominado DGPS. Seu uso original foi na navegação, mas atualmente pode ser empregado em várias atividades. As observáveis GNSS envolvidas no DGNSS são as pseudodistâncias. O DGNSS pode proporcionar precisão da ordem de decímetros no posicionamento tanto em tempo real quanto pós-processado.

O conceito de DGNSS envolve o uso de um receptor estacionário em uma estação base com coordenadas conhecidas, rastreando todos os satélites visíveis. O processamento dos dados nessa estação base, por PPS, permite que se calculem as correções posicionais, uma vez que as coordenadas desta estação base são conhecidas. Essas correções, isto é, diferenças entre as coordenadas obtidas por PPS e as coordenadas conhecidas da estação base são transmitidas ao receptor GNSS móvel, que realiza o PPS e aplica as correções nas coordenadas obtidas pelo PPS (Figura 5.1).

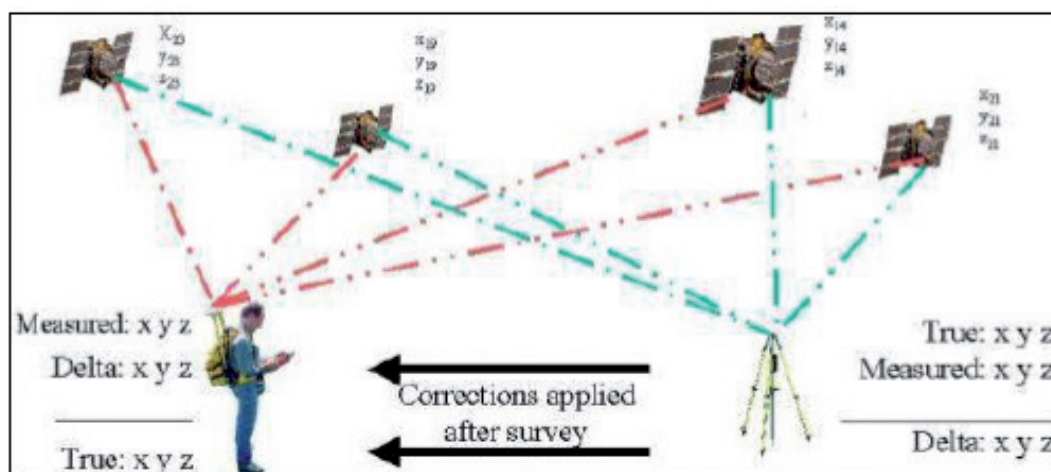


Figura 5.1 – Conceito de GNSS diferencial (DGNSS).

O DGNSS também pode ser realizado no domínio das observações, a partir do cálculo das correções para as pseudodistâncias pelo receptor base. O princípio do DGNSS se baseia no fato de que se a estação base estiver próxima da estação móvel, existe alta correlação dos erros envolvidos, principalmente o erro orbital, o erro do relógio do satélite, e os efeitos da troposfera e da ionosfera. Um aspecto importante no DGNSS é o intervalo de transmissão das correções e suas variações. Quanto maior o intervalo de transmissão, menor a acurácia da posição corrigida, pois, as correlações entre os erros das estações base e móvel reduzem-se com o passar do tempo.

Entretanto, a transmissão da variação da correção em função do tempo para a estação móvel visa reduzir esse problema. Desta forma, se envia para a estação móvel as correções para uma época t_0 e a taxa de variação destas correções em função do tempo. Estudos antes do desligamento da técnica SA mostram que um atraso de 10 segundos das correções resulta em uma degradação da acurácia da ordem de 0,5 m. Com o desligamento da SA em 2000, essa situação passou a não ser tão problemática. O formato largamente utilizado para a transmissão das correções é o RTCM (*Radio Technical Commission for Maritime Services*) SC-104, utilizando transmissores via rádio como antenas UHF (Figura 5.2). Mais recentemente, as correções também passaram a ser transmitidas via internet, utilizando o protocolo NTRIP (*Networked Transport of RTCM via Internet Protocol*).



Figura 5.2 – Receptor GNSS, rádio e antena externa para transmissão das correções via UHF.

No DGNSS no domínio das observações, a pseudodistância de um satélite específico ($\Delta PD^s(t_k)$) tem a seguinte forma:

$$\Delta PD^s(t_k) = \Delta PD^s(t_i) + \Delta PD^s(t_k - t_i)$$

com $\Delta PD^s(t_i) = PD_r^s(t_i) - p_r^s(t_i) - c(dt_r - dt^s)$, $\Delta PD^s = \frac{\Delta PD^s(t_i) - \Delta PD^s(t_{i-1})}{t_i - t_{i-1}}$

onde $\Delta PD^s(t_i)$ é a correção para a pseudodistância relativa aquele satélite na época t_i e ΔPD^s é a variação da correção da pseudodistância relativa aquele satélite em função do tempo, e ambos os termos são calculados na estação base e transmitidos a estação móvel para corrigir o PPS da estação móvel na época t_k , posterior a época t_i . A estação móvel recebe a correção $PD^s(t_i)$ e a aplica para corrigir a pseudodistância do satélite na época t_k ($PD_r^s(t_k)$), resultando na pseudodistância relativa ao satélite corrigida ($(PD_r^s)_{corr}$):

$$(PD_r^s)_{corr} = (PD_r^s(t_k) - \Delta PD^s(t_k))$$

O mesmo procedimento é feito para todas as pseudodistâncias dos demais satélites na época t_k , e, por meio das pseudodistâncias corrigidas, a estação móvel executa o PPS relativo a época t_k . Estudos mostram que se a latência das correções for de até 10 segundos e a distância de até 50 km, a precisão posicional será decimétrica (Figura 5.3). Um método que visa reduzir a limitação do DGNSS quanto a decorrelação espacial é o WADGPS (*Wide Area DGNSS*).

Error Source	Stand-alone (hand-held) GPS (m)	DGPS (m)
Satellite Clocks	3.0	0.0
Orbit Errors	2.7	0.0
Ionosphere	8.2	0.4
Troposphere	1.8	0.2
Receiver Noise	0.3	0.3
Multipath	0.6	0.6
User Equivalent Range Error	±9.4	±0.9

Figura 5.3 – Exemplo de magnitude dos erros no PPS (coluna central) e no DGPS (coluna a direita).

5.1. WADGNSS

Para se explorar todo o potencial do DGNSS, as separações entre as estações de referência não devem ultrapassar cerca de 200 km. Portanto, centenas de estações DGNSS deveriam ser estabelecidas para atender aos mais diversos tipos de usuários de uma área mais abrangente. O WADGNSS foi desenvolvido para que fossem reduzidas as deficiências inerentes ao DGNSS, sem a necessidade de estabelecer um grande número de estações. Enquanto o DGNSS produz uma correção escalar para cada uma das pseudodistâncias, um sistema de WADGNSS proporciona um vetor de correções composto dos erros das efemérides e do relógio para cada satélite, além de parâmetros dos efeitos ionosféricos e troposféricos. Estas correções podem ser transmitidas ao receptor móvel, por exemplo, por meio de um satélite geoestacionário utilizando o formato RTCM-SC104 (Figura 5.4).

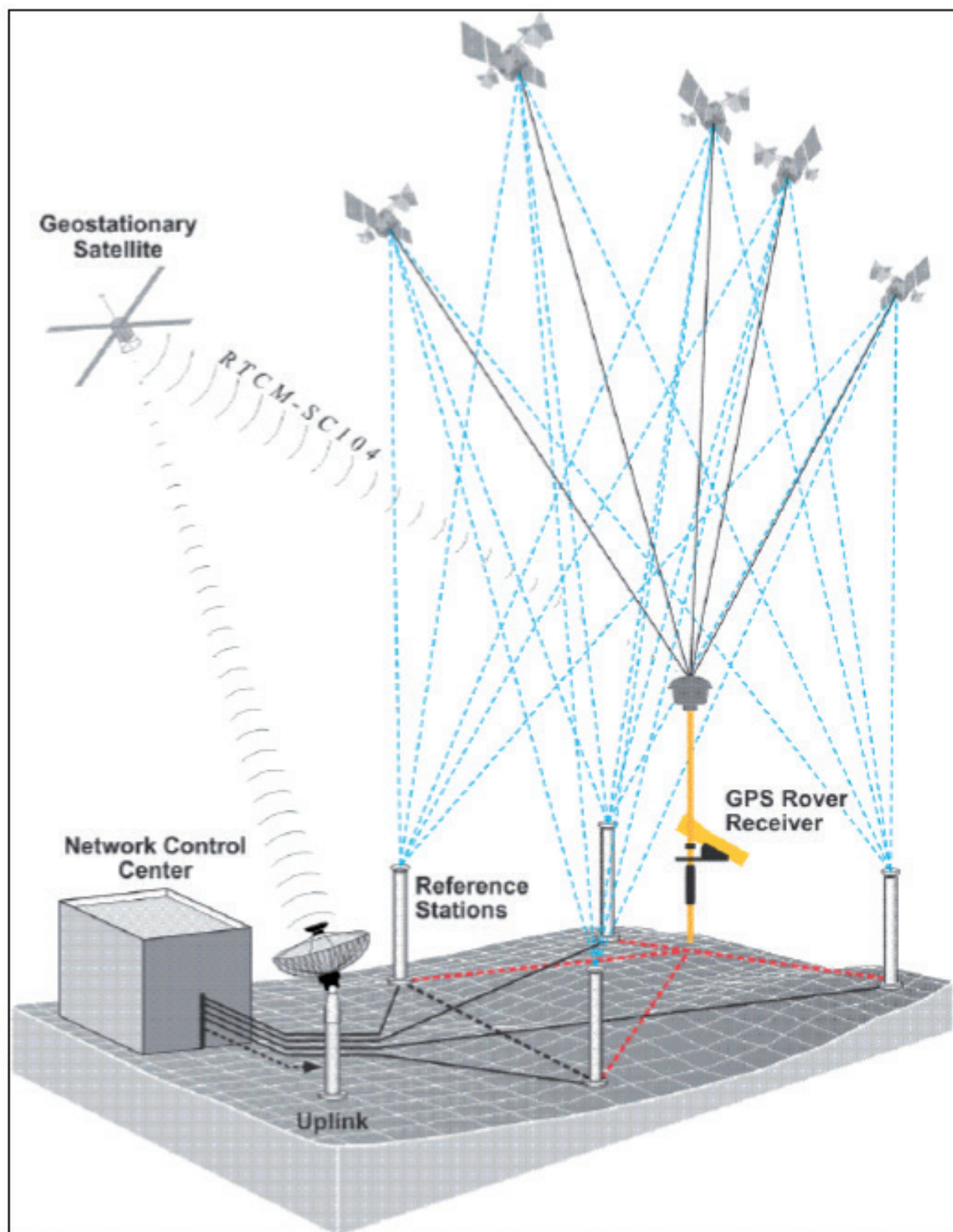


Figura 5.4 – Conceito do WADGNSS (múltiplas estações bases).

Na composição de um sistema de WADGNSS, há pelo menos uma estação monitora, estações de referência e o sistema de comunicação. Cada estação de referência é equipada com oscilador e receptor GNSS de dupla ou tripla frequência. As medidas coletadas em cada estação de referência são enviadas para a estação

monitora, a qual estima e analisa o vetor de correções. Normalmente a observável utilizada é a pseudodistância filtrada pela fase, isto é, uma combinação entre a pseudodistância e a fase da onda portadora de maior precisão em relação ao emprego somente da pseudodistância. As correções são transmitidas para os usuários por um sistema de comunicação conveniente, como por exemplo, satélites de comunicação geoestacionários, redes FM, internet e etc. A pseudodistância filtrada pela fase, em ciclos de onda, para um receptor de simples frequência (L1), é dada por:

$$PD_{fil}^c(t_i) = \frac{1}{i} PD_{L1}^c(t_i) + \frac{i-1}{i} [PD_{fil}^c(t_{i-1}) + \varphi_{L1}(t_i) - \varphi_{L1}(t_{i-1})]$$

onde i é o número de instantes, t_i é a época de rastreo e t_{i-1} é a época de rastreo imediatamente anterior, PD_{L1}^c é a pseudodistância em ciclos em L1, isto é, pseudodistância original dividida pelo comprimento de onda da L1, e φ_{L1} é a fase da onda portadora L1. A precisão de PD_{fil}^c aumenta conforme o número de instantes (épocas de observação) aumenta, contanto que não ocorra perdas de ciclo (sinal). Nestes casos, o algoritmo da pseudodistância filtrada pela fase deve ser reiniciado, isto é, o número de instantes retorna para $i = 1$.

O sistema WADGNSS pode utilizar ainda estação de referência virtual (VRS – *Virtual Reference Station*). A técnica VRS consiste em gerar dados GNSS para uma posição previamente escolhida, sem que ocorra uma ocupação física do local. Os dados são obtidos por meio de modelos matemáticos que simulam as condições de observação que seriam encontradas no terreno, tomando por base os dados reais das estações de referência com coordenadas conhecidas. Para gerar a VRS para um determinado usuário, a sua localização aproximada deve ser transmitida para o computador de controle central. Dessa forma, um *link* de comunicação bi-direcional entre o usuário e o controle central deve ser estabelecido. Essa comunicação pode ser realizada, por exemplo, via internet por meio de *smartphones*. O computador central gera o arquivo de observação dessa estação virtual e o envia para o usuário, que pode realizar o posicionamento DGNSS utilizando a VRS como se fosse uma estação base nas suas proximidades (Figura 5.5).

Vários serviços de WADGNSS, de caráter comercial, têm sido utilizados no mundo. O JPL da NASA tem desenvolvido um serviço WADGNSS de abrangência global (GDGPS – Global Differential GPS). Conforme visto anteriormente, muitos sistemas SBAS utilizam o conceito do WADGNSS, como o norte-americano WAAS, o europeu EGNOS, o japonês MSAS e etc., devendo o usuário utilizar receptores desenvolvidos especialmente para esses serviços, isto é, com sistemas adequados de comunicação e transmissão de dados.

No Brasil, os serviços mais populares oferecidos pelo mercado são o Omnistar do grupo Fugro e o Starfire do grupo John Deere. O Omnistar utiliza-se de oito satélites geoestacionários para transmissão dos dados visando disponibilidade global, necessita de receptores específicos para recepção das correções, e geralmente fornece precisão decimétrica para receptores de simples frequência e em torno de 15 cm para receptores de dupla frequência. Atualmente, há uma grande quantidade de receptores no mercado que possibilitam a aquisição de sinal WADGNSS, incluindo o WAAS e o EGNOS.

Nos últimos anos, o IBGE oferece, gratuitamente, o posicionamento por DGNSS por meio das estações da RBMC, sendo as correções transmitidas via internet por meio do protocolo NTRIP (Figura 6.5). Para isto, o usuário necessita realizar um cadastro e dispor de comunicação por internet para acessar o serviço denominado RBMC-IP. Ressalta-se que não se trata de um serviço de DGNSS em rede, isto é, com múltiplas estações de referência (WADGNSS). No caso, o usuário realiza o DGNSS com base nas correções geradas apenas pela estação da RBMC mais próxima.

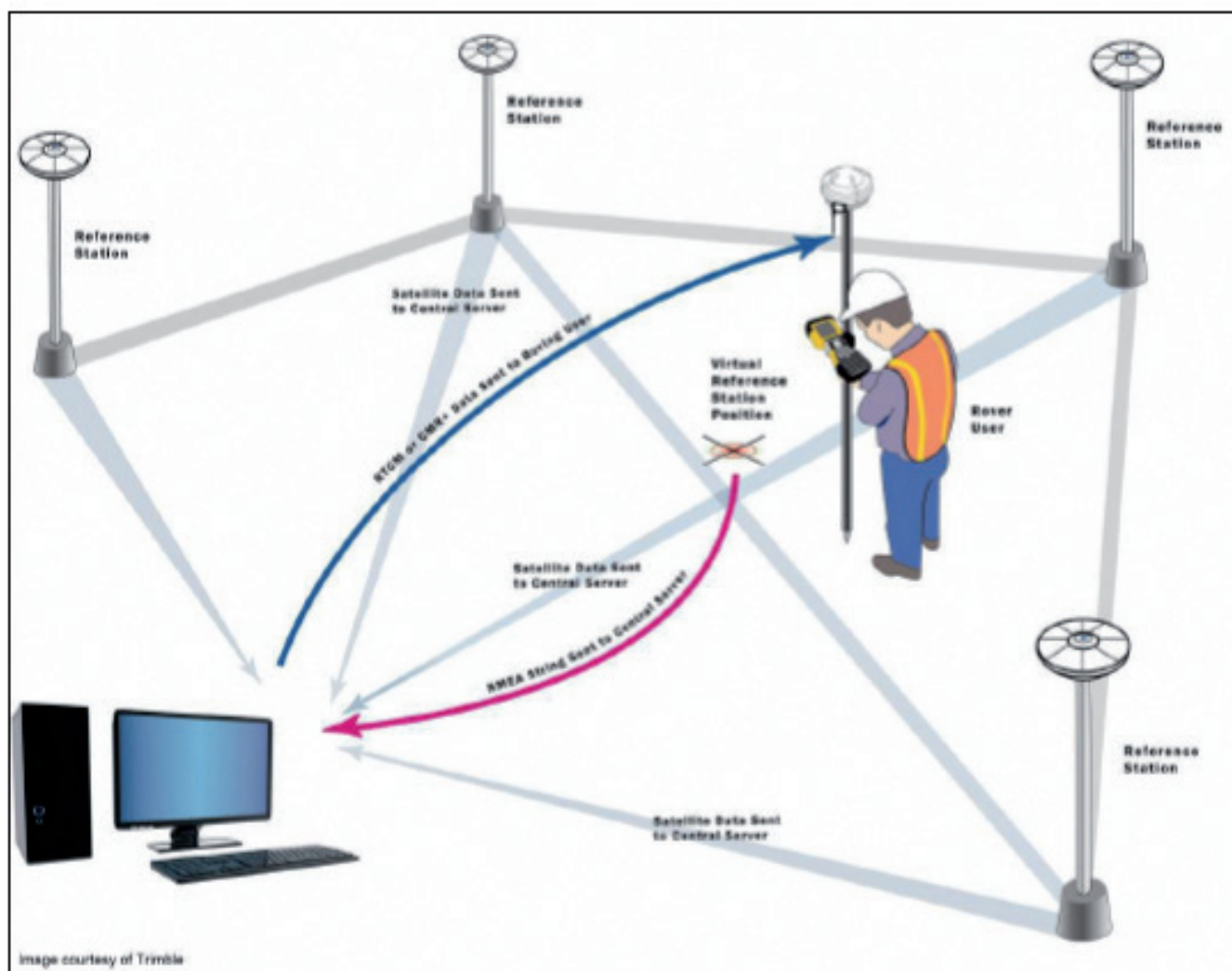


Figura 5.5 – WADGNSS utilizando estação de referência virtual (VRS).

A Tabela 5.1 apresenta um resumo do método DGNSS.

Tabela 5.1 – Resumo do método de posicionamento por GNSS diferencial (DGNSS).

Error Source	Stand-alone (hand-held) GPS (m)	DGPS (m)
Satellite Clocks	3.0	0.0
Orbit Errors	2.7	0.0
Ionosphere	8.2	0.4
Troposphere	1.8	0.2
Receiver Noise	0.3	0.3
Multipath	0.6	0.6
User Equivalent Range Error	±9.4	±0.9



Figura 5.5 – Estações da RBMC que transferem dados em tempo real via NTRIP (serviço RBMC-IP).

6. Posicionamento por Ponto Preciso (PPP)

O PPS refere-se à determinação da posição do receptor com base em observações de pseudodistância, derivadas de algum código, obtendo a órbita (posição) e os demais parâmetros dos satélites em função das efemérides transmitidas. Quando se utilizam as observáveis de pseudodistância e/ou fase da onda portadora, coletadas por receptores de simples, dupla, ou tripla frequência, porém, utilizando efemérides precisas para a órbita e erro do relógio dos satélites, se trata do Posicionamento por Ponto Preciso (PPP, ver Figura 6.1). Este método tem apresentado grande potencialidade para aplicações que exijam alta acurácia, como a geodinâmica, além de apresentar grandes vantagens se comparado com o processamento de redes GNSS (posicionamento relativo), onde há um grande dispêndio computacional.

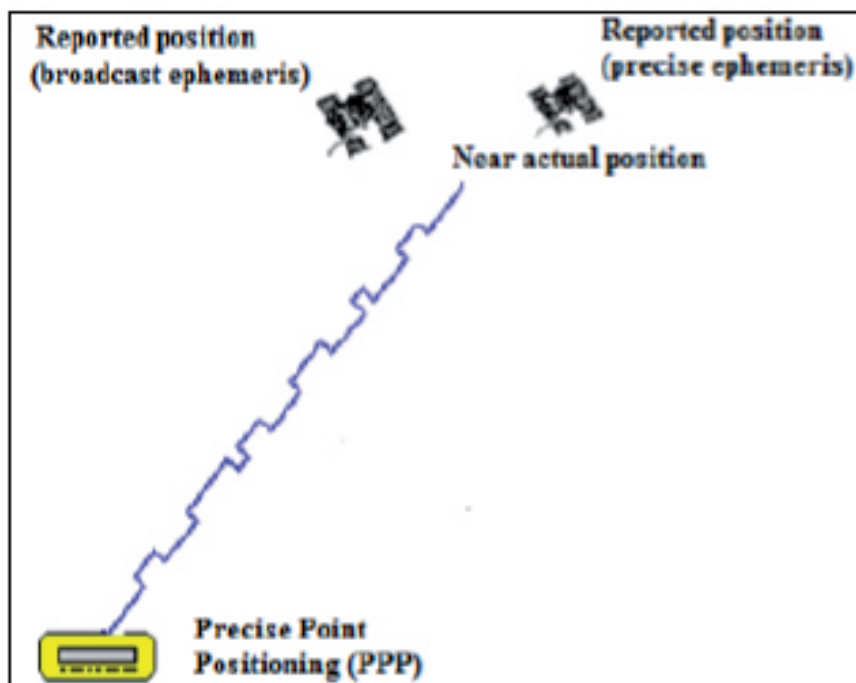


Figura 6.1 – Conceito do posicionamento por ponto preciso (PPP).

Nas efemérides precisas, ou pós-processadas, a órbita (posição) e o erro do relógio (tempo) dos satélites são estimados com alta precisão e disponibilizados por algum meio de comunicação, como por exemplo, a Internet. Essas informações têm sido produzidas e disponibilizadas pelo IGS e centros associados, sem nenhum custo. Atualmente, o IGS produz três tipos de efemérides e correções para o relógio dos satélites, denominadas de efemérides IGS, IGR e IGU (ver o Capítulo 2).

O sistema de referência vinculado ao posicionamento será aquele das efemérides precisas, geralmente o ITRF vigente (atualmente ITRF2014). No PPP, as coordenadas e o erro do relógio do receptor GNSS podem ser considerados os parâmetros locais, enquanto outros parâmetros como a órbita e o erro do relógio dos satélites, podem ser considerados como parâmetros globais. Uma rede global de monitoramento GNSS estima os parâmetros globais e resulta nas efemérides precisas, o que permite ao usuário solucionar os parâmetros locais (coordenadas do receptor) por meio do PPP para cada época de observação (Figura 6.2). Para receptores de dupla ou tripla frequência, deve-se usar como observável GNSS no processamento, a combinação linear livre dos efeitos da ionosfera (*ion-free*), e para receptores de simples frequência, deve-se minimizar estes efeitos com emprego de algum modelo da ionosfera disponível (por exemplo, Modelo de Klobuchar).

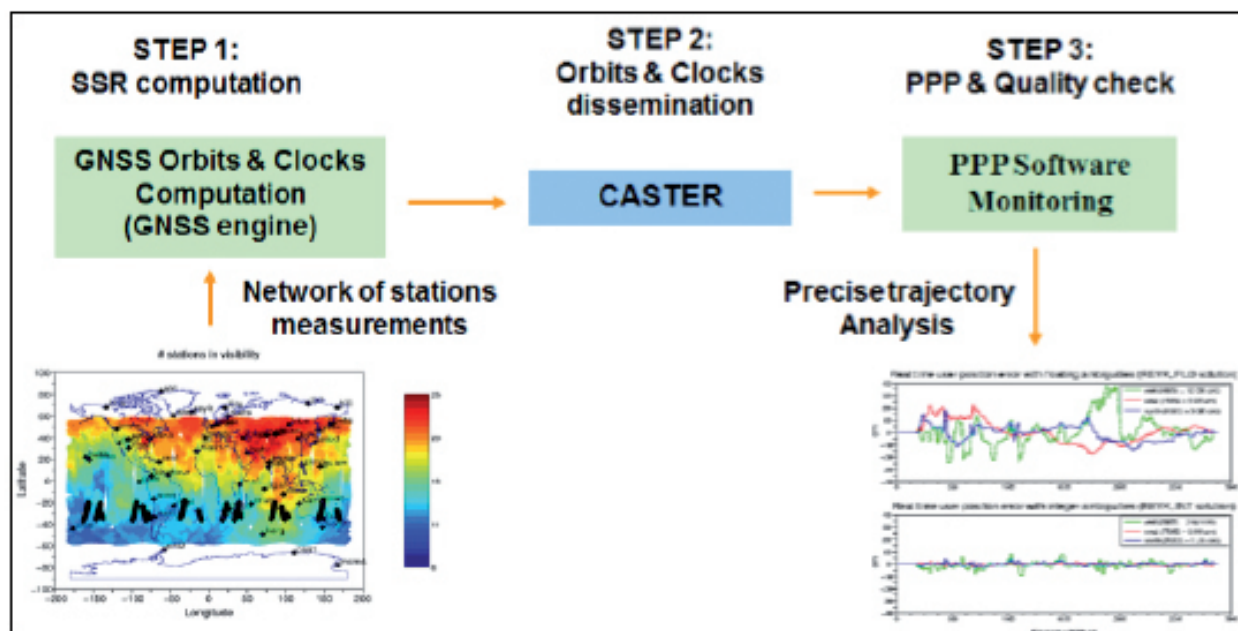


Figura 6.2 – Estrutura de funcionamento de um serviço de PPP.

As incógnitas envolvidas no PPP são as coordenadas X,Y,Z do receptor, presentes na distância geométrica entre o satélite e o receptor, o erro do relógio do receptor, o atraso troposférico zenital residual e o vetor de ambiguidades para a fase da portadora *ion-free*. As coordenadas do satélite, também presentes na distância geométrica, e o erro do relógio do satélite, são fornecidos nas efemérides precisas, enquanto o atraso troposférico aproximado é dado por algum modelo disponível, como por exemplo, o Modelo de Hopfield. Outros parâmetros podem ser considerados ainda no modelo matemático, como por exemplo, variação do centro de fase da antena do receptor, marés terrestres, cargas oceânicas, efeitos relativísticos, efeitos de segunda ordem da ionosfera e a fase *wind-up*, dependendo do *software* de processamento utilizado.

Para receptores de dupla ou tripla frequência, o PPP fornece, normalmente, precisão centimétrica no modo de posicionamento estático, e decimétrica no modo de posicionamento cinemático. O período de convergência, isto é, o intervalo de tempo requerido para iniciar um posicionamento com precisão centimétrica é de, geralmente, 30 minutos, podendo tornar-se significativamente mais longo, antes da solução convergir para um posicionamento com precisão milimétrica (Figura 6.3). Explorando a aplicação de técnicas para a obtenção de solução fixa para a ambiguidade, o PPP tem o potencial para reduzir o tempo de convergência da solução, de minutos para segundos, tal como no posicionamento relativo cinemático em tempo real. Entretanto, tais métodos de solução rápida da ambiguidade no PPP ainda estão em estudo.

Precisão esperada para um levantamento estático (metros)				
Tipo de Receptor	Uma frequência		Duas frequências	
	Planimétrico	Altimétrico	Planimétrico	Altimétrico
Após 1 hora	0,450	1,000	0,030	0,050
Após 2 horas	0,300	0,800	0,015	0,025
Após 4 horas	0,200	0,500	0,006	0,015
Após 6 horas	0,180	0,400	0,004	0,010

Figura 6.3 – Precisão esperada em um posicionamento estático por meio do PPP (Fonte: IBGE).

6.1. SERVIÇOS DE PPP ON-LINE

O PPP tem sido empregado, principalmente pela comunidade científica, desde a década de 90, limitado basicamente aos usuários com acesso a programas computacionais de processamento de dados de caráter mais científico, como por exemplos, os *softwares* Bernese e Gipsy-OASIS. Porém, a partir dos anos 2000, o PPP ganhou um impulso significativo em sua popularização devido principalmente ao surgimento de serviços gratuitos de processamento *on-line*. As principais organizações que têm disponibilizado esse tipo de serviço são: o JPL da NASA (serviço APPS – *Automatic Precise Point Positioning*), a UNB (Serviço GAPS – *GPS Analysis and Positioning software*), a GMV (*magicPPP*) e o NRCan (serviço CSRS-PPP – *Canadian Spatial Reference System-Precise Point Positioning*).

Em geral, estes serviços de PPP são gratuitos, exigindo apenas um cadastramento do usuário no sistema, a exceção do GAPS, que também é gratuito, mas não exige um pré-cadastramento do usuário. Em geral também, estes serviços processam dados de receptores de dupla frequência, seja no modo estático, seja no modo cinemático, ambos de maneira pós-processada. Entretanto, o serviço de PPP do JPL da NASA, por exemplo, também oferece processamento de dados em tempo real, porém, em caráter comercial (não gratuito). O CSRS-PPP do NRCan está disponível *on-line* desde novembro de 2003, processando dados GLONASS desde 4 de Outubro de 2011.

Para utilizar os serviços, o usuário, após o cadastramento, simplesmente envia o arquivo de dados GNSS no formato RINEX pela internet na página eletrônica do serviço, informando se a ocupação é estática ou cinemática. Após pouco tempo o *link* com o resultado do processamento é enviado para o *e-mail* do usuário, cadastrado previamente (Figura 6.4). O sistema de referência adotado pelos serviços, em geral, é o ITRF vigente no dia que as efemérides precisas foram processadas (atualmente ITRF2014, anteriormente ITRF2008 ou antes ainda ITRF2005).

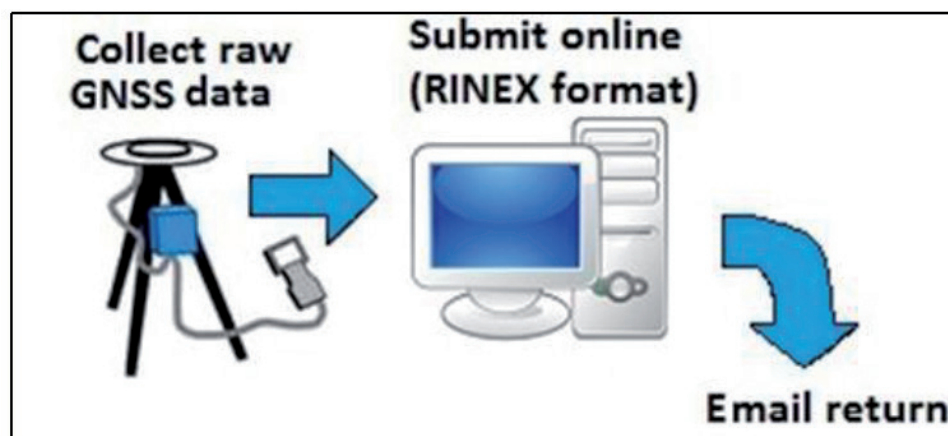


Figura 6.4 – Funcionamento de um serviço on-line de PPP.

Para o usuário do Brasil, é interessante notar que o sistema de referência oficial do país é o SIRGAS2000, compatível, em termos práticos, com o ITRF2000. A época relacionada às coordenadas estimadas pelo serviço é referente ao dia do arquivo de dados GNSS. Dessa forma, o usuário deve estar atento, pois, se necessário, qualquer atualização à outra época fica sobre sua responsabilidade. Por exemplo, no caso do SIRGAS2000, a época de referência é Maio de 2000 ou 2000,4. Para isto, pode-se utilizar as velocidades das coordenadas obtidas por algum modelo de velocidades disponível, como o VEMOS2009 (*VELOCITY MOdel for SIRGAS* – modelo de velocidades para o SIRGAS, disponível em: <http://www.sirgas.org/index.php?id=54>). É importante ressaltar que a marca, modelo e altura da antena do receptor GNSS devem estar no cabeçalho do arquivo de dados que foi submetido, pois, o serviço irá aplicar as correções e reduções do centro de fase da antena buscando automaticamente esses dados no arquivo RINEX.

O GAPS da UNB (*University of New Brunswick/Canada*) processa gratuitamente dados GPS de dupla frequência no formato RINEX, no modo estático ou cinemático, em ITRF2000, sem necessidade de pré-cadastramento do usuário, usando efemérides do IGS (página do serviço: <http://gaps.gge.unb.ca/>). O APPS do JPL (*Jet Propulsion Laboratory*) da NASA (*National Aeronautics and Space Administration/EUA*) processa gratuitamente dados GPS de dupla frequência no formato RINEX, no modo estático ou cinemático, no ITRF vigente, bastando fazer um pré-cadastramento

do usuário, usando efemérides da rede GDPGS (*Global Differential GPS*) do JPL (página do serviço <http://apps.gdgps.net/>). O serviço também processa, em caráter comercial, o PPP em tempo real, seja na superfície terrestre ou em voos. O *magicPPP da GMV Innovation e Solutions* (Espanha), processa gratuitamente dados GPS e GLONASS de dupla frequência (GPS somente, GLONASS somente, ou GPS + GLONASS), no formato RINEX, no modo estático ou cinemático, em ITRF2008 ou ETRS89, bastando fazer um pré-cadastramento do usuário, usando efemérides do IGS (página do serviço: <http://magicgnss.gmv.com/ppp/>). O CSRS-PPP do NRCAn (*Natural Resources Canada*) processa gratuitamente dados GPS e GLONASS de simples e dupla frequência, no formato RINEX, no modo estático ou cinemático, no ITRF vigente ou em NAD-83, bastando fazer um pré-cadastramento do usuário, usando efemérides do IGS e do NRCAn (página do serviço <http://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/tools-outils/ppp.php?locale=en>).

O IBGE também disponibiliza gratuitamente o serviço do CSRS-PPP (IBGE-PPP, disponível em <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/ppp/default.shtm>). Uma vantagem em utilizar o IBGE-PPP é que as coordenadas do ponto são fornecidas em SIRGAS2000, isto é, o próprio serviço converte as coordenadas para o sistema de referência oficial do país em sua época de referência (Maio de 2000), utilizando o modelo de velocidades VEMOS2009.

Recentemente, o IBGE também passou a fornecer um serviço gratuito de PPP em tempo real, sendo que já fornecia serviços DGPS e RTK em tempo real. Para isto, o IBGE tem acesso as efemérides em tempo real produzidas pelo IGS, preditas com base em uma rede mundial de monitoramento em tempo real com centenas de estações, incluindo algumas da RBMC. Para realizar o PPP em tempo real, é necessário o cadastro gratuito de acesso ao servidor NTRIP Caster do IBGE (Figura 6.5), que também possibilita o posicionamento DGPS e RTK em tempo real via internet com base nas dezenas de estações de monitoramento em tempo real da RBMC. Para mais detalhes, acessar a página do IBGE-PPP, e também ver: http://mundogeoconnect.com/2013/arquivos/palestras/19_jun-i-sonia-alves.pdf.

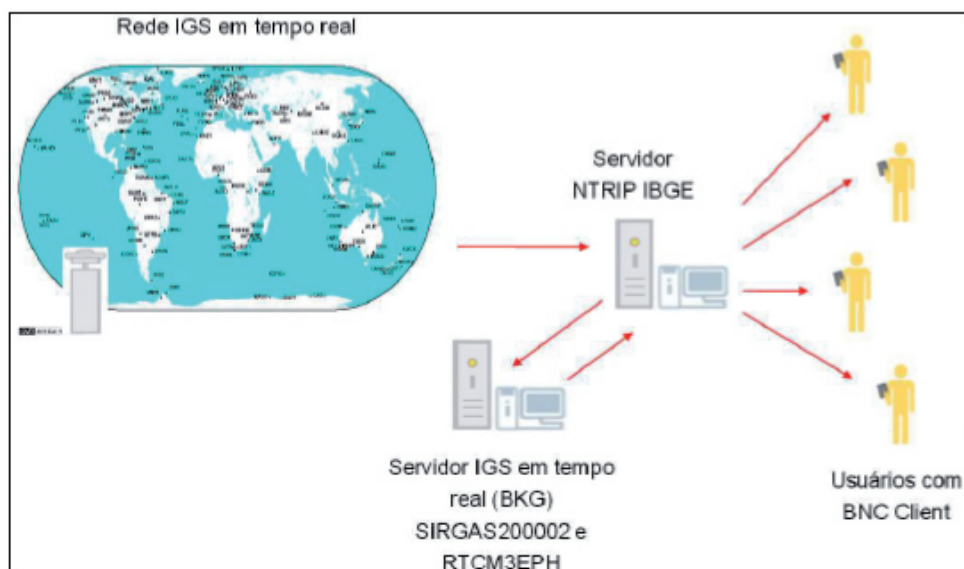


Figura 6.5 – Funcionamento do serviço de PPP em tempo real do IBGE.

A Tabela 6.1 apresenta um resumo do PPP.

Tabela 6.1 – Resumo do método de posicionamento por ponto preciso (PPP).

Observáveis utilizadas:	Pseudodistância (<i>ion-free</i> para receptores de dupla frequência)
Erros corrigidos:	Erro do relógio do satélite, Relatividade, rotação da Terra
Erros parcialmente corrigidos:	-
Erros minimizados:	-
Erros estimados:	Erro do relógio do receptor, erro orbital, efeitos da troposfera e da ionosfera
Erros eliminados/cancelados	Nenhum
Erros negligenciados:	Multicaminho, variação do centro de fase da antena, fase <i>wind-up</i>
Precisão esperada:	Decímetros
Finalidade:	Posicionamento de média precisão

7. Posicionamento Relativo (PR)

Para realizar o posicionamento relativo (PR), o usuário deve dispor de dois ou mais receptores GNSS. No entanto, com o advento dos chamados Sistemas de Controle Ativos (SCA), essa realidade mudou, como por exemplo, a RBMC. Desta forma, atualmente, possuindo apenas um receptor, pode-se realizar o PR. Para isto, deve-se acessar os dados de uma ou mais estações pertencentes a um SCA, como por exemplo, acessar aos dados da RBMC, cuja disponibilidade é gratuita e diária no site do IBGE, com arquivos de 24h de rastreo e taxa de dados de 15s.

No contexto do posicionamento relativo, utilizam-se, em geral, as Duplas Diferenças (DD) como observáveis GNSS fundamentais, podendo ser a DD da fase da onda portadora e/ou a DD das pseudodistâncias. Os resultados são as componentes da linha-base, ou seja, as distâncias relativas (ΔX , ΔY , ΔZ) entre os dois receptores (Figura 7.1), em relação a um referencial cartesiano geocêntrico, no caso do GPS, por exemplo, o WGS-84 G1762. O posicionamento relativo é comumente subdividido em: PR estático, PR estático-rápido, PR semi-cinemático e PR cinemático.

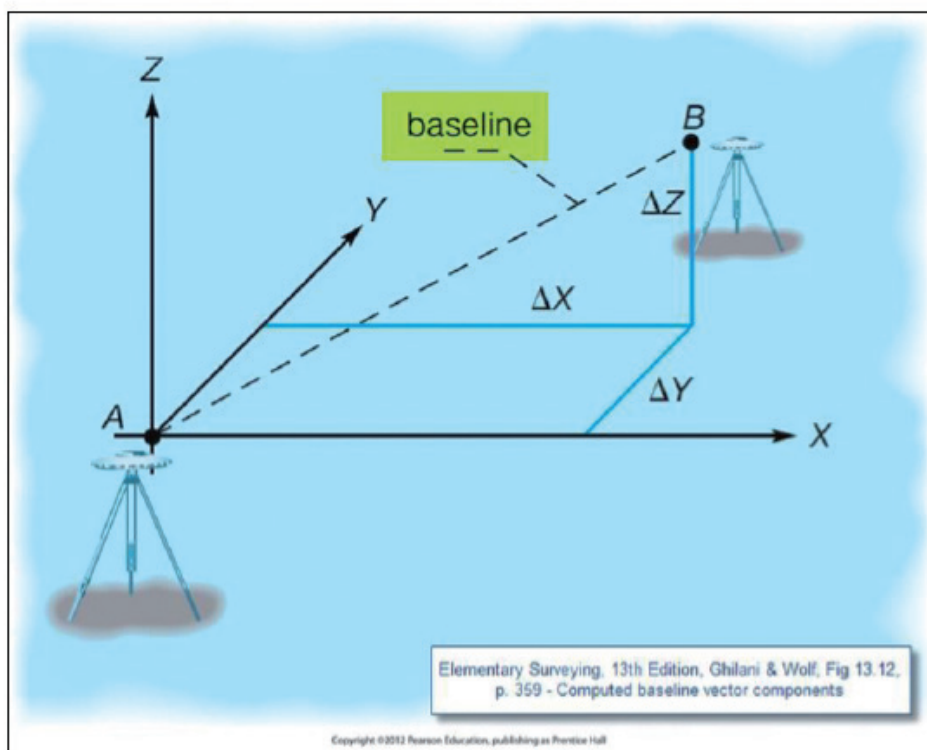


Figura 7.1 – Conceito de posicionamento relativo: Componentes da linha-base entre dois receptores GNSS.

O princípio fundamental do posicionamento relativo é que os dois ou mais receptores envolvidos rastreiem, simultaneamente, pelo menos dois satélites GNSS comuns, ou seja, que ocorra a simultaneidade das observações. Quando se realizam diferenças entre observáveis coletadas simultaneamente, objetiva-se, sobretudo, reduzir alguns tipos de erros. Deve-se então escolher a simultaneidade entre dois instantes: o de recepção do sinal ou o de transmissão do sinal. Sinais que são recebidos no mesmo instante são transmitidos em instantes diferentes, e sinais que são transmitidos no mesmo instante são recebidos em instantes diferentes. Isso só não ocorreria se as distâncias entre os receptores e os satélites fossem exatamente iguais, possibilidade extremamente remota.

Um dos problemas para se determinar com exatidão a simultaneidade são os erros dos relógios dos receptores envolvidos (dt_r), que, em geral, são diferentes. Desta forma, utiliza-se normalmente um pré-processamento por meio do PPS para determinar o erro do relógio dos receptores envolvidos no PR, e assim, melhorar a determinação da simultaneidade entre as observações dos diferentes receptores envolvidos. No caso do instante de recepção do sinal ser escolhido, deve-se considerar que o instante de transmissão do sinal para os receptores é diferente, e, portanto, as coordenadas do satélite também são diferentes, enquanto no instante

de transmissão do sinal, as coordenadas do satélite são iguais, embora os instantes de recepção do sinal sejam diferentes nos dois receptores. Geralmente, é adotado o instante de transmissão do sinal, devido ao fato das coordenadas do satélite não se alterarem.

7.1. PR ESTÁTICO

Neste tipo de PR, dois ou mais receptores rastreiam simultaneamente, em modo estático (Figura 7.2), os satélites visíveis por um período de tempo de no mínimo 20 minutos, podendo se estender até dezenas de horas. A fase da onda portadora e a pseudodistância são as observáveis GNSS fundamentais. Entretanto, elas podem ser rearranjadas em uma combinação linear envolvendo observáveis GNSS do mesmo receptor ou de diferentes receptores, como exemplo já visto, cita-se a observável ion-free em um mesmo receptor. Dentre as diversas combinações lineares possíveis envolvendo observáveis de diferentes receptores, uma das mais utilizadas no PR é a observável denominada dupla diferença (DD), que é obtida pela diferenciação entre duas simples diferenças (SD). Uma SD pode ser obtida entre um satélite e dois receptores (Figura 7.3) ou entre dois satélites e um receptor, uma DD pode ser obtida entre dois satélites e dois receptores (Figura 7.4), enquanto uma tripla diferença (TD) pode ser obtida entre dois satélites e dois receptores em duas épocas diferentes (Figura 7.5).

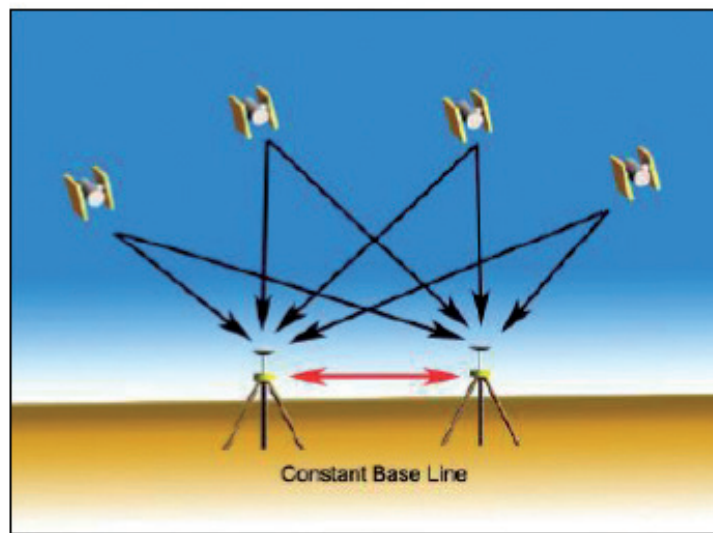


Figura 7.2 – Conceito de PR estático.

As diferenças realizadas entre as observáveis originais, isto é, fase da onda portadora e/ou pseudodistâncias do código, têm o objetivo de minimizar e eliminar determinados erros sistemáticos envolvidos no posicionamento. Os erros do relógio dos satélites são eliminados na formação das simples diferenças, pois o erro do relógio do satélite é o mesmo para os dois receptores, e os erros dos relógios dos receptores são eliminados na formação da dupla diferença, pois o erro do relógio de um receptor é o mesmo no rastreamento de cada satélite. Além disso, erros devido a órbita dos satélites e as refrações troposférica e ionosférica são minimizados, em especial em linhas-bases curtas. As DD são formadas para cada época de observação, para um mesmo instante de transmissão do sinal do satélite. Por exemplo, se a taxa de coleta de dados do rastreamento GNSS for de 15 em 15 segundos, serão formadas DDs a cada 15s. Figura 7.3 – Formação da SD da fase da portadora de um satélite (a) em dois receptores GNSS (q e r).

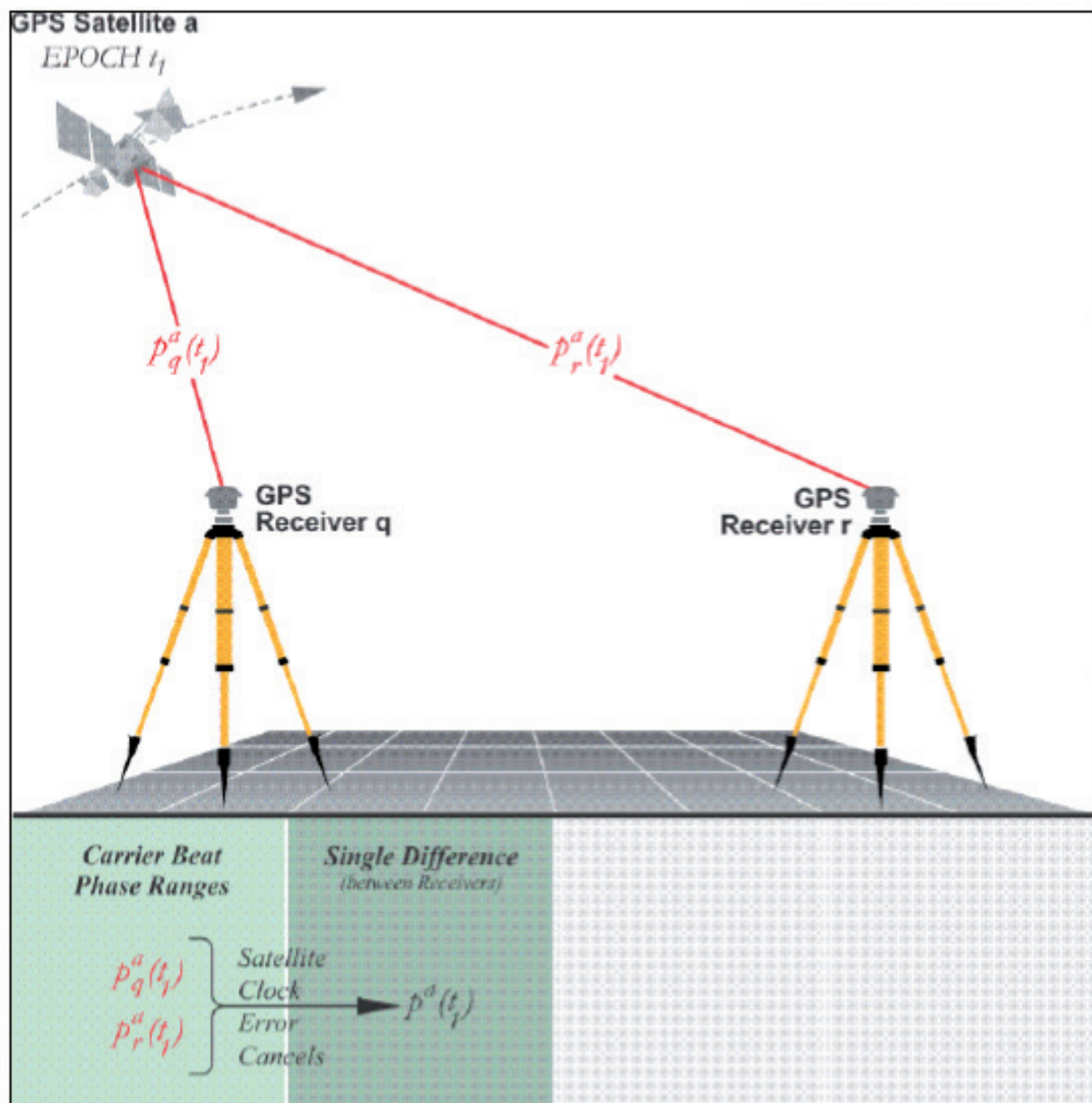


Figura 7.3 – Formação da SD da fase da portadora de um satélite (a) em dois receptores GNSS (q e r).

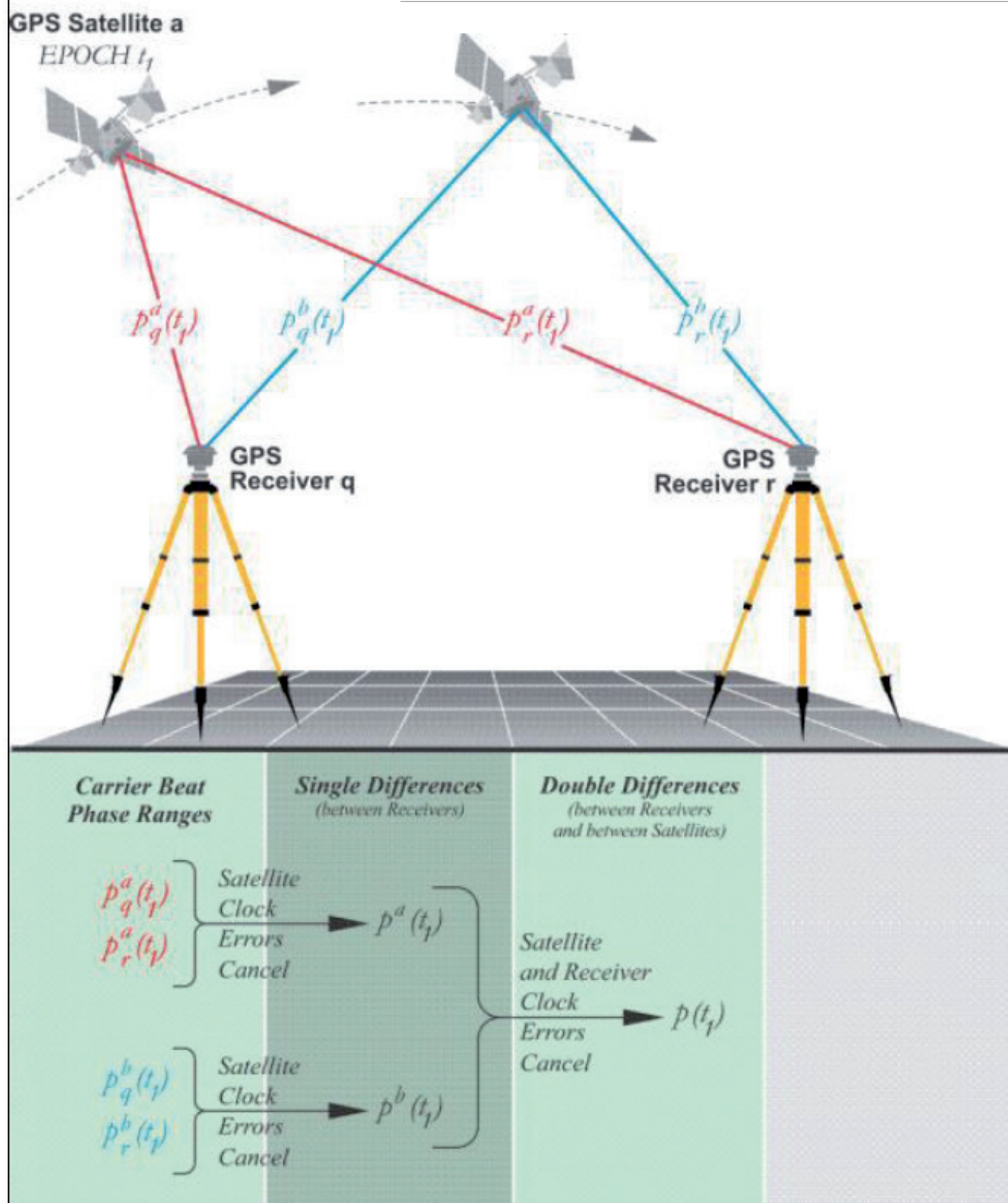


Figura 7.4 – Formação da DD da fase da portadora entre dois satélites (a e b) e dois receptores GNSS (q e r).

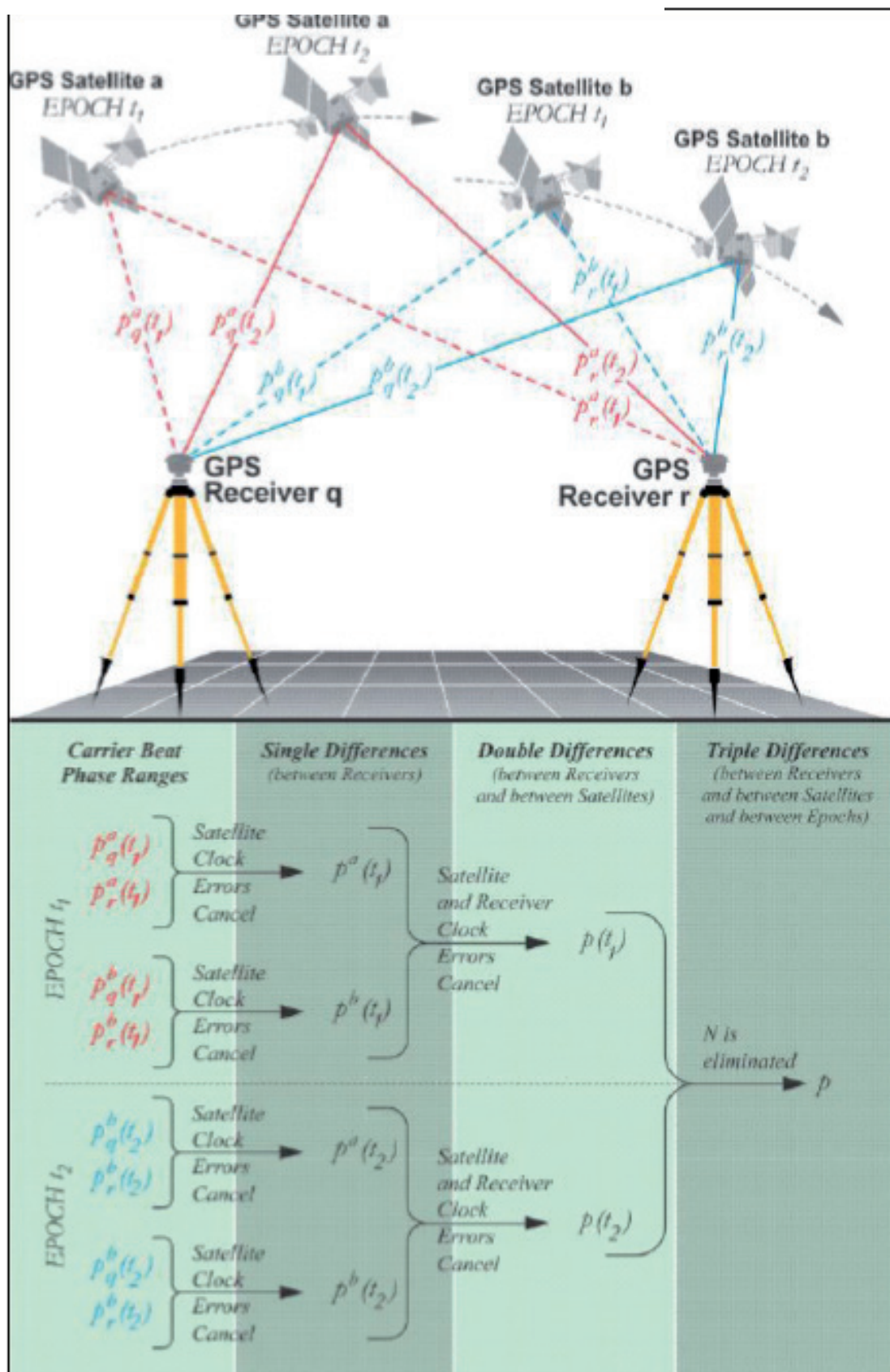


Figura 7.5 – Formação da TD entre a fase da portadora de dois satélites (a e b) e dois receptores GNSS (q e r) em duas épocas diferentes de rastreamento (t_1 e t_2).

Para dois satélites $s1$ e $s2$ e dois receptores $r1$ e $r2$, a fase da onda portadora ion-free, as simples diferenças entre os dois receptores e cada satélite e a dupla diferença entre os dois receptores e os dois satélites em um dado instante, considerando as fases da portadora *ion-free*, são dadas por:

$$\begin{aligned}\varphi_{IFr1}^{s1} &= \frac{f_{L1}^2}{(f_{L1}^2 - f_{L2}^2)} \varphi_{L1r1}^{s1} - \frac{f_{L1} \cdot f_{L2}}{(f_{L1}^2 - f_{L2}^2)} \varphi_{L2r1}^{s1}, & \varphi_{IFr1}^{s2} &= \frac{f_{L1}^2}{(f_{L1}^2 - f_{L2}^2)} \varphi_{L1r1}^{s2} - \frac{f_{L1} \cdot f_{L2}}{(f_{L1}^2 - f_{L2}^2)} \varphi_{L2r1}^{s2} \\ \varphi_{IFr2}^{s1} &= \frac{f_{L1}^2}{(f_{L1}^2 - f_{L2}^2)} \varphi_{L1r2}^{s1} - \frac{f_{L1} \cdot f_{L2}}{(f_{L1}^2 - f_{L2}^2)} \varphi_{L2r2}^{s1}, & \varphi_{IFr2}^{s2} &= \frac{f_{L1}^2}{(f_{L1}^2 - f_{L2}^2)} \varphi_{L1r2}^{s2} - \frac{f_{L1} \cdot f_{L2}}{(f_{L1}^2 - f_{L2}^2)} \varphi_{L2r2}^{s2} \\ \Delta\varphi_{IFr1,r2}^{s1} &= \varphi_{IFr1}^{s1} - \varphi_{IFr2}^{s1} = \frac{f_{L1}^2}{(f_{L1}^2 - f_{L2}^2)} \varphi_{L1r1}^{s1} - \frac{f_{L1} \cdot f_{L2}}{(f_{L1}^2 - f_{L2}^2)} \varphi_{L2r1}^{s1} - \frac{f_{L1}^2}{(f_{L1}^2 - f_{L2}^2)} \varphi_{L1r2}^{s1} + \frac{f_{L1} \cdot f_{L2}}{(f_{L1}^2 - f_{L2}^2)} \varphi_{L2r2}^{s1} \\ \Delta\varphi_{IFr1,r2}^{s2} &= \varphi_{IFr1}^{s2} - \varphi_{IFr2}^{s2} = \frac{f_{L1}^2}{(f_{L1}^2 - f_{L2}^2)} \varphi_{L1r1}^{s2} - \frac{f_{L1} \cdot f_{L2}}{(f_{L1}^2 - f_{L2}^2)} \varphi_{L2r1}^{s2} - \frac{f_{L1}^2}{(f_{L1}^2 - f_{L2}^2)} \varphi_{L1r2}^{s2} + \frac{f_{L1} \cdot f_{L2}}{(f_{L1}^2 - f_{L2}^2)} \varphi_{L2r2}^{s2} \\ \Delta\nabla\varphi_{IFr1,r2}^{s1,s2} &= \Delta\varphi_{IFr1,r2}^{s1} - \Delta\varphi_{IFr1,r2}^{s2} \\ &= \frac{f_{L1}^2}{(f_{L1}^2 - f_{L2}^2)} \varphi_{L1r1}^{s1} - \frac{f_{L1} \cdot f_{L2}}{(f_{L1}^2 - f_{L2}^2)} \varphi_{L2r1}^{s1} - \frac{f_{L1}^2}{(f_{L1}^2 - f_{L2}^2)} \varphi_{L1r2}^{s1} + \frac{f_{L1} \cdot f_{L2}}{(f_{L1}^2 - f_{L2}^2)} \varphi_{L2r2}^{s1} \\ &\quad - \frac{f_{L1}^2}{(f_{L1}^2 - f_{L2}^2)} \varphi_{L1r1}^{s2} + \frac{f_{L1} \cdot f_{L2}}{(f_{L1}^2 - f_{L2}^2)} \varphi_{L2r1}^{s2} + \frac{f_{L1}^2}{(f_{L1}^2 - f_{L2}^2)} \varphi_{L1r2}^{s2} - \frac{f_{L1} \cdot f_{L2}}{(f_{L1}^2 - f_{L2}^2)} \varphi_{L2r2}^{s2}\end{aligned}$$

onde nas expressões acima, φ_{IFr1}^{sj} é a fase da portadora ion-free para o receptor i ($i = 1$ ou 2) e o satélite j ($j = 1$ ou 2), f_{L1} e f_{L2} são, respectivamente, as frequências das portadoras L1 e L2, $\Delta\varphi_{IFr1,r2}^{s1}$ e $\Delta\varphi_{IFr1,r2}^{s2}$ são, respectivamente, a simples diferença da fase da portadora *ion-free* para os receptores $r1$ e $r2$ e o satélite $s1$ e para os receptores $r1$ e $r2$ e o satélite $s2$, e $\Delta\nabla\varphi_{IFr1,r2}^{s1,s2}$ é a dupla diferença da fase da portadora *ion-free* para os receptores $r1$ e $r2$ e os satélites $s1$ e $s2$ em um mesmo instante de transmissão do sinal.

Geralmente, um satélite é considerado como satélite de referência, e as DDs são formadas levando-se em conta observações deste com os demais satélites, pois as equações devem ser linearmente independentes entre si. Ou seja, para n satélites visíveis, comuns aos dois receptores, tem-se $n - 1$ DDs linearmente independentes para cada época de observação. Na prática, a modelagem estocástica das observações geralmente é simplificada, desconsiderando a correlação entre as observações de diferentes épocas, resultando em uma matriz de covariância diagonal no ajustamento.

O referencial do posicionamento, WGS-84 G1762 no caso das efemérides transmitidas do GPS, por exemplo, está implícito nas coordenadas dos satélites, podendo as duas estações ter as suas coordenadas estimadas no ajustamento, ou uma delas ser considerada fixa (estação base), facilitando o processo computacional. A observável normalmente adotada no PR estático é a DD da fase da onda portadora, muito embora se possa utilizar também a DD da pseudodistância, ou ainda ambas, sendo que os casos em que se empregam as duas observáveis proporcionam melhores resultados em termos de acurácia. Além disso, em razão da duração da coleta de dados ser relativamente longa (maior que 20 minutos), o vetor das ambiguidades, exceto por alguns problemas não esperados, é facilmente solucionado, devido à grande alteração da geometria dos satélites.

O PR estático permite obter precisão da ordem de 1 ppm, ou até melhor do que isso. No entanto, para linhas-base longas, isto é, maiores que 20 km, se a precisão requerida for melhor que 1 ppm, é imprescindível o uso de receptores de dupla ou tripla frequência, por causa, principalmente, do erro devido a ionosfera. No caso de linhas-base muito longas e receptores de dupla ou tripla frequência, por causa da alta variação do erro devido a ionosfera, também se utiliza as DDs, porém, não da fase da onda portadora, mas sim, a DD da observável ion-free (L0), que já é uma combinação linear da fase da onda nas portadoras L1 e L2.

Existe ainda uma terceira combinação linear possível denominada de tripla diferença (TD). Na tripla diferença é realizada a diferença entre duas DD de duas épocas, envolvendo dois receptores e dois satélites. A tripla diferença da pseudodistância não oferece vantagens sobre outras combinações lineares de pseudodistâncias (ion-free, SD, DD e etc.). A tripla diferença da fase da onda portadora elimina o vetor de ambiguidades (N), pois, contanto que não ocorra perda de sinal, N é constante para duas épocas de rastreo diferentes, o que representa uma grande vantagem em relação a DD. Entretanto, geralmente ela não é utilizada pois o ruído resultante (desvio-padrão) da TD se torna bem maior, além de introduzir correlação (covariância) temporal entre as várias TD de épocas distintas, sendo muito difícil de modelar estocasticamente, ou seja, definir de maneira adequada a matriz de covariância das observações no ajustamento. De qualquer forma, como esta observável é sensível a perdas de ciclos, por causa do vetor de ambiguidades, ela é muito utilizada na detecção das perdas de ciclos na etapa de pré-processamento dos dados (Figura 7.6).

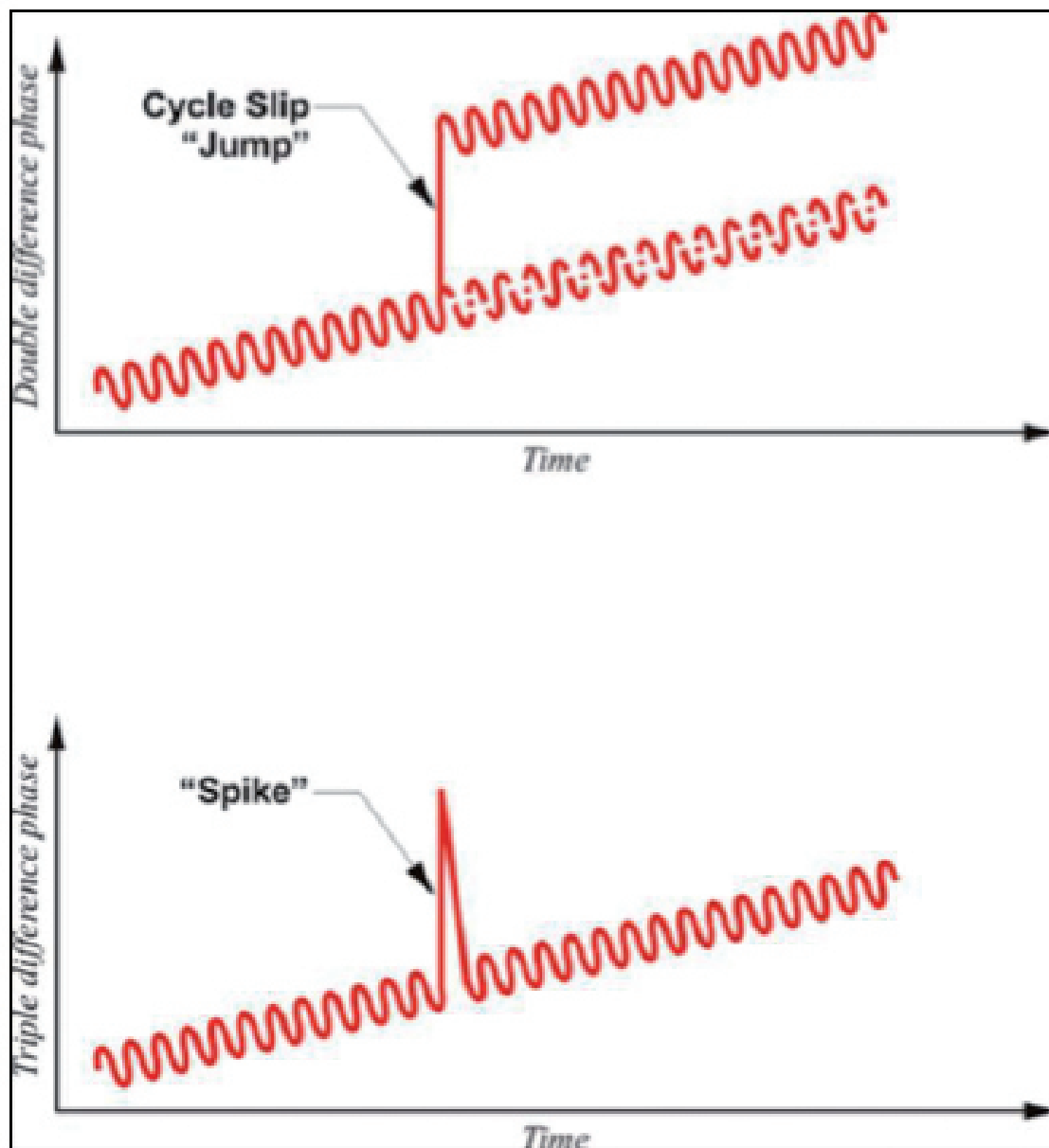


Figura 7.6 – Falha na detecção da perda de ciclos (sinal) utilizando a DD e sucesso utilizando a TD.

A Tabela 7.1 apresenta as possibilidades de formação de DD para os diferentes tipos de receptores GPS. Para os demais sistemas GNSS, a relação é análoga.

Tabela 7.1 – Possibilidades de formação de DDs para os diferentes tipos de receptores GPS.

	DDs Pseudodistâncias	DDs Fase da portadora
Navegação	C/A, P(Y) em L1, L1C, M em L1	-
Simplex frequência	C/A, P(Y) em L1, L1C, M em L1	L1
Dupla frequência	C/A, P(Y) em L1 e L2, L1C, L2C, M em L1 e L2, <i>ion-free</i> (diversos)	L1, L2, <i>ion-free</i> (L1/L2)
Tripla frequência	C/A, P(Y) em L1 e L2, L1C, L2C, M em L1 e L2, L5, Q5, <i>ion-free</i> (diversos)	L1, L2, L5, <i>ion-free</i> (L1/L2, L1/L5, L2/L5)

7.2. PR ESTÁTICO-RÁPIDO

O PR estático-rápido segue o mesmo princípio do PR estático. A diferença fundamental diz respeito ao período de ocupação da estação de interesse que não deve exceder 20 minutos. Um receptor serve como base, permanecendo fixo sobre uma estação de referência e coletando dados, enquanto o outro receptor percorre as estações de interesse (receptor móvel ou rover), sendo que em cada uma das quais este permanece rastreando dados GNSS entre 5 a 20 minutos (Figura 7.7).

Para que os resultados apresentem alto nível de precisão, o vetor de ambiguidades (N) envolvido em cada linha-base deve ter seus elementos solucionados como valores inteiros, sendo que para cada linha-base, não havendo perdas de ciclo (sinal), tem-se $n - 1$ ambiguidades, sendo n o número de satélites em comum rastreados pelos dois receptores. Devido ao pouco tempo de ocupação, que impossibilita uma grande mudança da geometria dos satélites, uma técnica especial de solução rápida da ambiguidade deve ser empregada, como por exemplo, uma técnica OTF (*on the fly*), que será vista no capítulo 8. O PR estático-rápido é adequado para levantamentos de linhas-base de até 10 km, e sob circunstâncias normais, sua precisão varia de 1 a 5 ppm. Normalmente, se adota o valor de 5s como taxa de coleta de dados do PR estático-rápido, enquanto no PR estático a taxa de coleta de dados é usualmente de 15s.

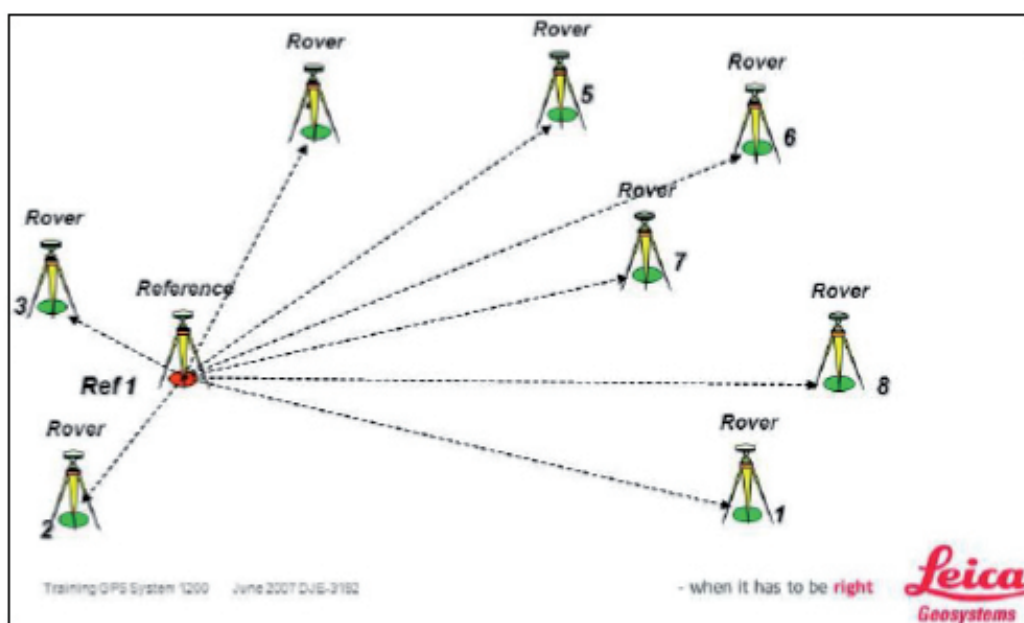


Figura 7.7 – Conceito do PR estático rápido.

7.3. PR SEMI-CINEMÁTICO (STOP AND GO)

O PR semi-cinemático também se baseia no fato de que a solução do vetor de ambiguidades de uma linha-base se a determinar requer que a geometria envolvida entre as duas estações e os satélites se altere com passar do tempo. Para tanto, coletam-se dados continuamente na estação-base e por, pelo menos, dois curtos períodos (por exemplo, 5 minutos) em cada estação que se pretende determinar as coordenadas. As duas ocupações em uma mesma estação a se determinar devem estar separadas por um intervalo de tempo longo o suficiente (no mínimo 20 minutos) para proporcionar a alteração na geometria dos satélites e permitir a solução das ambiguidades.

Durante esse intervalo, outras estações a se determinar podem ser ocupadas por um período de tempo relativamente curto, como por exemplo, cinco minutos (Figura 7.8). Entretanto, o método requer que o receptor móvel continue ligado na trajetória entre os diversos pontos de interesse. Além disso, não se pode perder a sintonia com o sinal dos satélites, pois, conforme já visto, cada perda de ciclo gera uma nova ambiguidade a ser solucionada.

Uma outra forma de realizar o PR semi-cinemático é um receptor ocupar um ponto de coordenadas conhecidas durante todo o levantamento (base), e o receptor móvel primeiramente ocupar por um longo período (20 a 30 minutos) o primeiro ponto a se determinar, visando solucionar o vetor das ambiguidades. Após isto, sem desligar o receptor móvel, se desloca aos demais pontos de interesse (Figura 7.9), ocupando cada um de forma rápida, sendo este método denominado de *stop and go* ("para e vai" ou "parar e ir").

Em outra possibilidade, empregada atualmente pelos receptores GNSS modernos, o usuário não precisa aguardar no primeiro ponto desconhecido para a solução das ambiguidades. Inicia-se o levantamento ocupando os pontos de interesse por poucos segundos, mas de forma que a duração total do levantamento, sem ocorrência de perdas de sinal, atinja algo em torno de 20 minutos, para posteriormente, utilizar algum método de solução rápida das ambiguidades. O nível de precisão é da mesma ordem que o do PR estático-rápido, de 1 a 5 ppm. Figura 7.8 – Conceito do PR semi-cinemático com reocupação dos vértices.

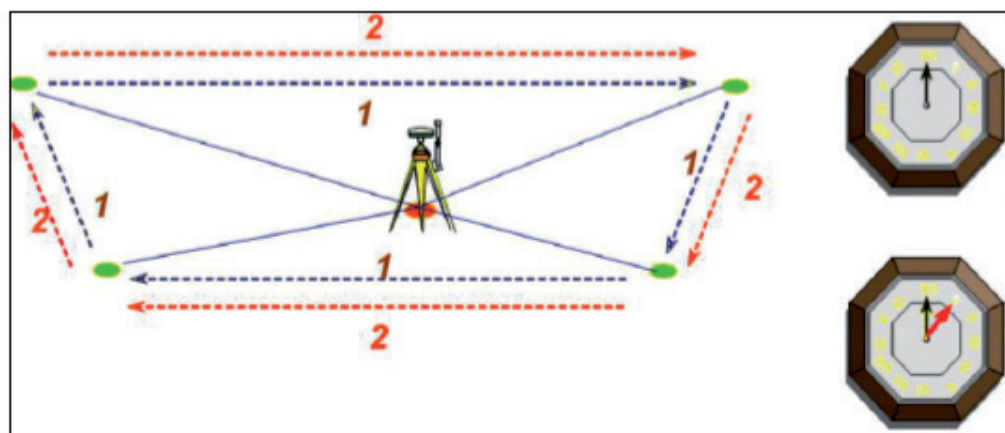


Figura 7.8 – Conceito do PR semi-cinemático com reocupação dos vértices.

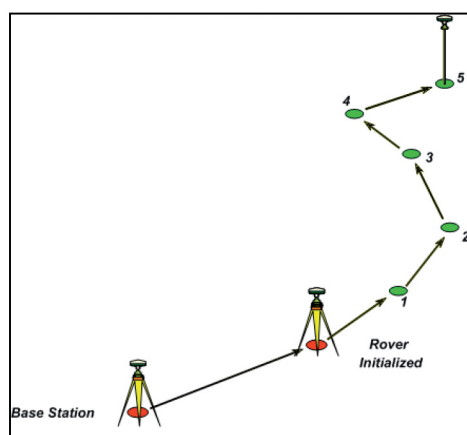


Figura 7.9 – Conceito do método de PR stop and go.

7.4. PR CINEMÁTICO

No PR cinemático tem-se como observável fundamental a fase da onda portadora, com, em geral, taxa de coleta de 1s ou menos. Os dados desse tipo de posicionamento podem ser pós-processados ou processados em tempo real. Assim como nos outros métodos de PR, um receptor ocupa um ponto de coordenadas conhecidas (estação base). O outro receptor (móvel ou rover) se desloca continuamente, de forma cinemática, sobre as feições de interesse. No modo pós-processado, após a coleta dos dados GNSS, o processamento é realizado em algum software específico.

Quanto a solução do vetor das ambiguidades, há duas opções: solucionar antes de iniciar o movimento ou estimá-lo com os dados coletados em movimento. No primeiro caso, deve-se ficar em um ponto até que a ambiguidade seja solucionada. Logo, deve-se esperar algo em torno de 20 a 30 minutos para a geometria dos satélites mudar o suficiente para a solução das ambiguidades, ou, ainda, utilizar algum método de solução rápida de ambiguidades, dependendo de quão moderno é o receptor ou software utilizado.

No segundo caso, se não houver perda de sintonia com os satélites, o vetor de ambiguidades permanece o mesmo durante todo o levantamento. Se todo o levantamento durar em torno de 20 a 30 minutos, sem perdas de sinal, é possível solucionar o vetor de ambiguidades. Ressalva-se que isto depende do receptor que está sendo utilizado, o manual do equipamento deve informar os métodos possíveis para solucionar as ambiguidades.

No PR cinemático, toda a trajetória da antena do receptor móvel é determinada, ou seja, em cada época de rastreo se considera um ponto diferente, mesmo se o receptor móvel permanecer estático durante alguns segundos. O receptor base, como nos demais métodos de PR, permanece estático durante todo o levantamento no ponto de coordenadas conhecidas.

7.5. PR CINEMÁTICO EM TEMPO REAL (RTK)

Normalmente, o processamento dos dados no PR é realizado após a coleta de dados. Entretanto, muitas aplicações apresentam grande benefício se as coordenadas do receptor móvel são determinadas em tempo real, como por exemplo, na locação e controle de obras, pois o PR é muito mais preciso que o posicionamento por ponto simples (PPS). Para que esse conceito seja realizado na prática, é necessário que os dados coletados na estação de referência (base) sejam transmitidos para a estação móvel, necessitando para isto de um *link* de rádio ou algum outro tipo de sistema de comunicação (celular, internet e etc.).

O receptor móvel deve dispor de *software* apropriado para a realização do processamento dos dados em tempo real, devendo adotar alguma metodologia para a solução quase instantânea do vetor de ambiguidades. Trata-se, portanto, de um método bastante similar ao DGNSS em tempo real. Porém, enquanto no DGNSS se utiliza pseudodistâncias e correções, no PR cinemático em tempo real se utiliza das DDs da fase da onda portadora (Figura 7.10). O PR cinemático em tempo real é chamado de RTK (*Real Time Kinematic* – cinemático em tempo real). Após a solução das ambiguidades e em condições normais, se nenhum imprevisto ocorrer, o RTK pode atingir a acurácia de poucos centímetros.

Atualmente, os receptores modernos que tem a capacidade de realizar o RTK utilizam-se de métodos de solução rápida (praticamente instantânea) da ambiguidade, como por exemplo, o método LAMBDA, que será visto posteriormente. Dessa forma, o usuário já realiza um PR em tempo real com precisão centimétrica, poucos segundos após iniciar os dois receptores.

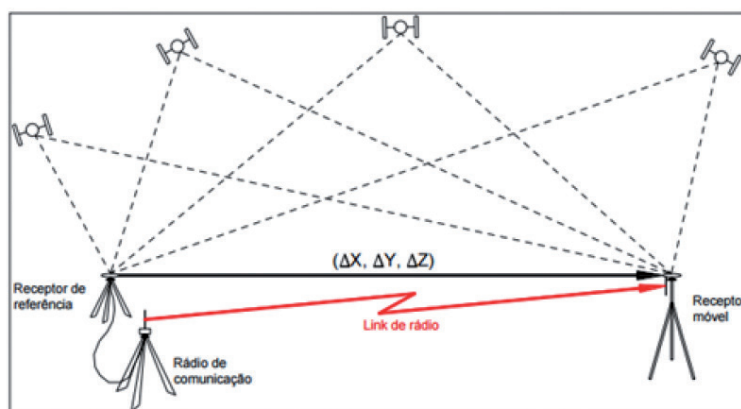


Figura 7.10 – Conceito do PR cinemático em tempo real (RTK).

No método RTK, ao invés da formação de DDs entre a estação base e a estação móvel, isto é, o PR cinemático em tempo real, pode-se estimar correções para a fase da onda portadora da estação base e transferir estas correções para a estação móvel, pois a linha-base é muito curta e os erros envolvidos para a fase da onda portadora nas duas estações são praticamente iguais, sendo este método denominado de DGNSS preciso (Figura 7.11). Esta técnica também pode apresentar acurácia centimétrica, com a vantagem de o processamento ser muito mais simples, pois são transmitidas correções da base ao rover ao invés da formação de DDs entre estes.

Tal como no DGNSS, o formato das correções diferenciais é definido pelos padrões recomendados pela RTCM SC-104 (formato RTCM 18/19 para as observáveis brutas e formato RTCM 20/21 para as correções diferenciais), podendo também ser transmitidos pela internet por meio do protocolo NTRIP. O emprego da técnica RTK, tanto no PR quanto no DGNSS preciso, é limitado em linhas de base de 5 a 10 km em virtude do alcance da transmissão de dados via rádio por meio do enlace VHF (*very high frequency*) ou UHF (*ultra high frequency*). Para redução deste problema, são desenvolvidos sistemas RTK em rede, tal como o WADGNSS (Figura 7.12).

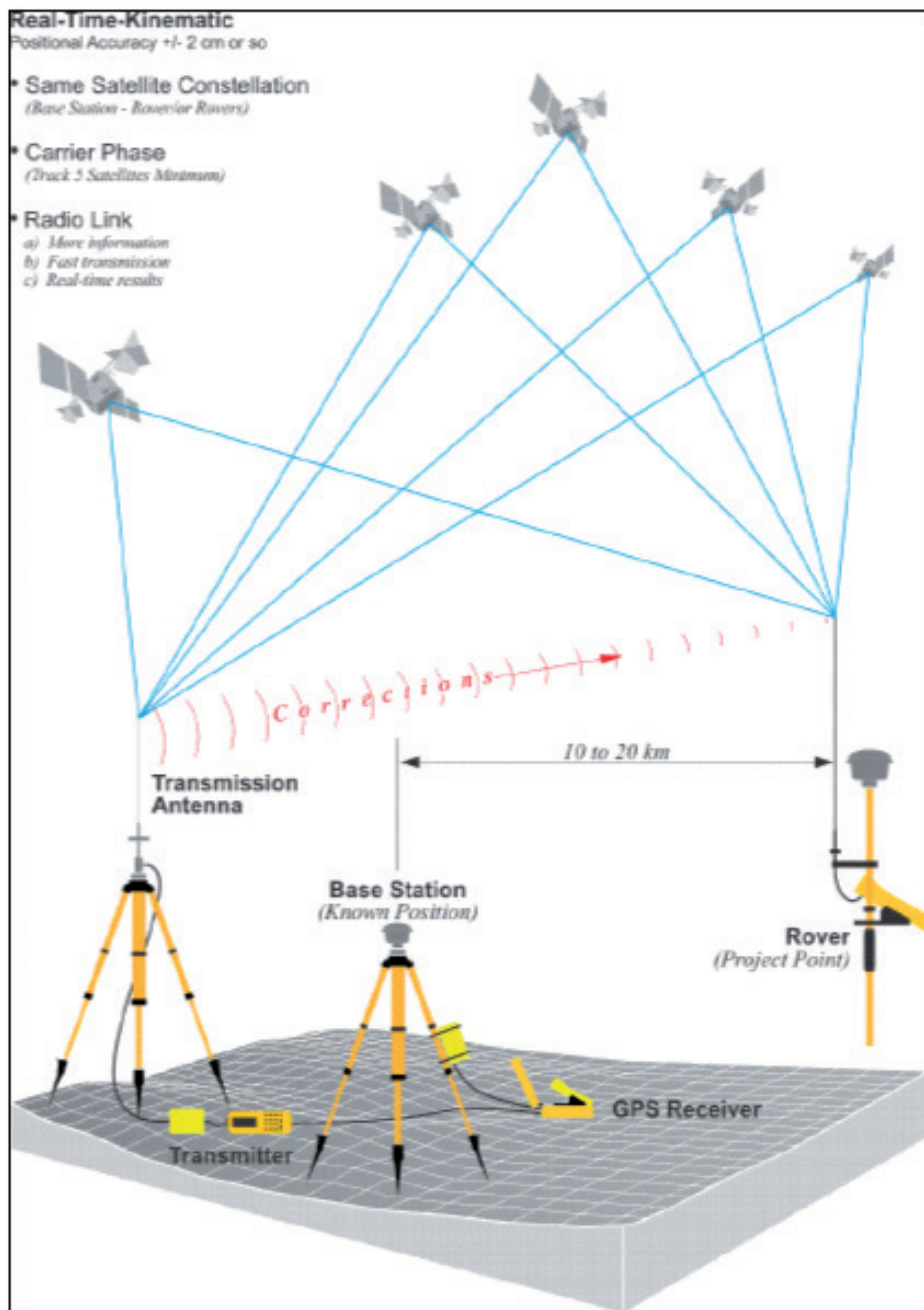


Figura 7.11 – Método RTK utilizando correções transmitidas via rádio (DGNSS preciso).

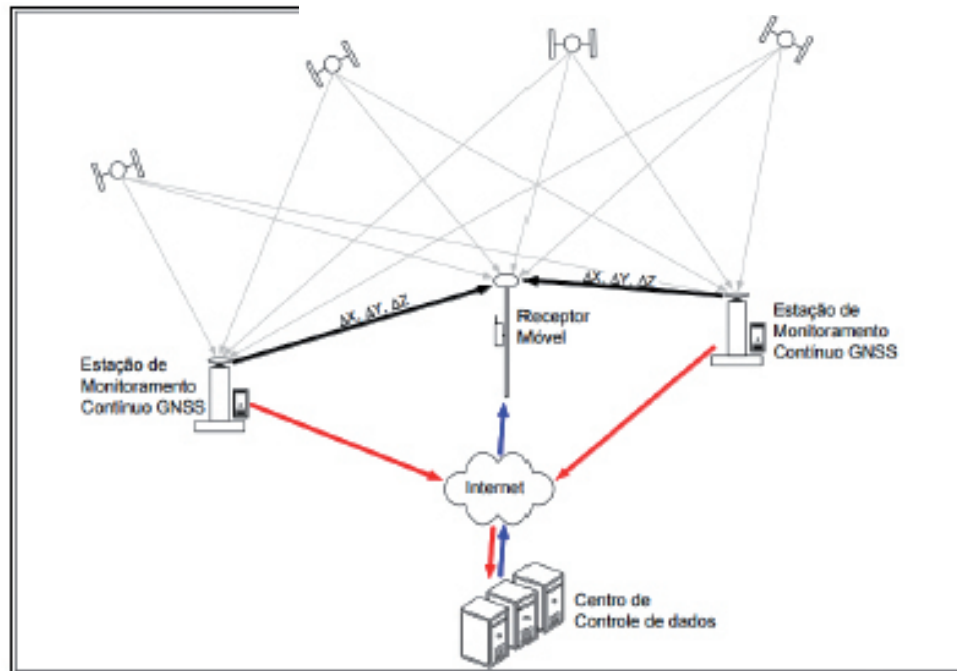


Figura 7.12 – Conceito de RTK (DGNS preciso) em rede.

No Brasil, é possível empregar o posicionamento por RTK utilizando estações da RBMC como referência, por meio da comunicação com alguma estação base via internet por protocolo NTRIP. No caso do RTK em rede, pode-se citar o exemplo do CEGAT (Centro Geodésico Alezi Teodolini), que atualmente dispõe de dezoito estações GNSS ativas, o faz com que em grande parte do território do estado de São Paulo a distância até uma estação mais próxima seja de no máximo 70 km. Entretanto, ressalva-se que este serviço é de caráter comercial, e, portanto, não gratuito.

Ressalta-se que receptores RTK podem empregar o método *stop and go* com rastreamento de alguns segundos ao invés de minutos em cada ponto. Uma das limitações de receptores RTK é a obstrução da comunicação entre a base e o *rover* devido a grandes obstáculos como morros e prédios, por exemplo. Nestes casos, pode-se utilizar antenas repetidoras em locais altos como topos de morros e prédios para manter a comunicação entre a base e o *rover* por dezenas de km.

7.6. SERVIÇOS GRATUITOS DE POSICIONAMENTO RELATIVO ON-LINE

Nos últimos anos, foram disponibilizados serviços gratuitos de posicionamento relativo *on-line*. Tal como os serviços PPP, para utilizar estes serviços, basta submeter arquivos de observação no formato RINEX e informar um endereço de e-mail para receber os resultados. Dentre estes serviços, pode-se citar o AUSPOS, do governo australiano, que utiliza o software científico Bernese (<http://www.ga.gov.au/bin/gps.pl>), o OPUS (*Online Positioning User Service*), do National Geodetic Survey dos EUA (<http://www.ngs.noaa.gov/OPUS/>), e o SCOUT (Scripps Coordinate Update Tool) da Universidade de Califórnia, que utiliza o software científico GAMIT (<http://sopac.ucsd.edu/scout.shtml>). Em geral, estes serviços apresentam o resultado em algum ITRF (por exemplo, ITRF2008). Por serem gratuitos, apresentam algumas limitações, como processar apenas dados GPS de dupla frequência no modo estático, utilizar apenas estações da rede do IGS como bases de referência, e não permitir alterações na estratégia de processamento por parte do usuário.

A Tabela 7.2 apresenta um resumo do método de posicionamento relativo (PR).

Tabela 7.2 – Resumo do método de posicionamento relativo (PR).

Observáveis utilizadas:	Simplex, duplas ou triplas diferenças
Erros corrigidos:	Relatividade, rotação da Terra
Erros parcialmente corrigidos:	-
Erros minimizados:	Refração troposférica e ionosférica, erro orbital, variação do centro de fase da antena, fase <i>wind-up</i>
Erros estimados:	-
Erros eliminados/cancelados:	Erro do relógio do satélite, erro do relógio do receptor
Erros negligenciados:	Multicaminho
Precisão esperada:	Centímetros ou milímetros
Finalidade:	Posicionamento de alta precisão

8. Solução das Ambiguidades

Conforme já visto, ao invés de utilizar pseudodistâncias obtidas por códigos binários modulados sobre as ondas portadoras, as distâncias entre o satélite e o receptor podem ser obtidas diretamente a partir das próprias ondas portadoras. Esse tipo de observação, dada em ciclos de onda, é chamado de fase da onda portadora. A fase da onda portadora é uma observável muito mais precisa (precisão de poucos milímetros) que a pseudodistância (precisão de decímetros), e trata-se da observável básica para as atividades que envolvam um posicionamento de alta precisão. A medida da fase da portadora é obtida pela diferença entre a fase do sinal recebida do satélite e a sua réplica gerada pelo receptor. Ao iniciar o receptor GNSS, na primeira medida efetuada, a observável da fase da portadora é a parte fracional de um ciclo de onda. Não se conhece nesta primeira época de observação, o número de ciclos inteiros entre o satélite (s) e a antena receptora (r), denominado de ambiguidade (N).

A partir da primeira época, o receptor consegue realizar a contagem dos ciclos inteiros de onda que chega do satélite até a antena receptora (Figura 8.1). Isto faz com que a medida da fase da onda portadora seja ambígua com relação ao número de ciclos inteiros envolvidos entre a antena receptora e os satélites na primeira época de observação, isto é, na primeira medida realizada logo após ligar o receptor GNSS. Quando a ambiguidade é solucionada corretamente, ou seja, o número de ciclos inteiros da primeira época de observação é determinado corretamente para todos os satélites rastreados, o posicionamento resultante é de alta precisão.

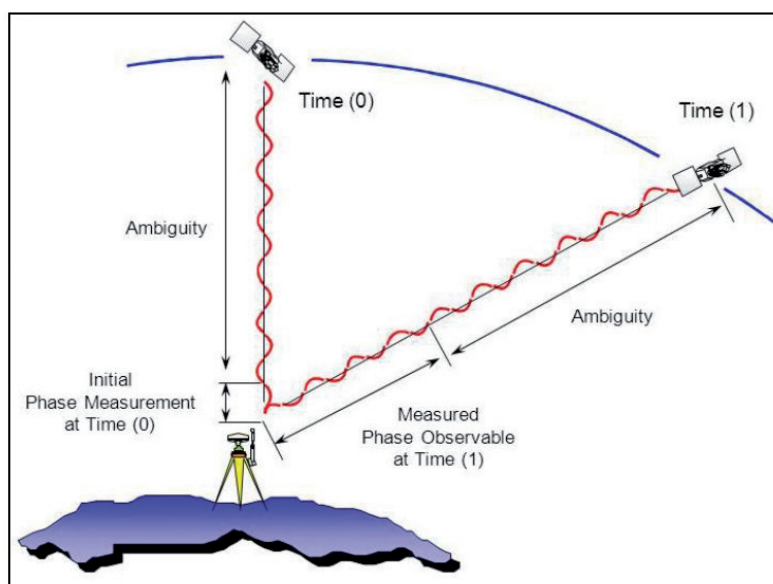


Figura 8.1 – ortadora na primeira época de observação.

No PR utilizando a fase da onda portadora, o vetor de ambiguidades N será composto por $n \cdot r$ termos, sendo n o número de satélites em comum aos r receptores envolvidos no PR (geralmente, $r = 2$). Na formação das DDs, a dimensão do vetor de ambiguidades N será reduzida para $n - 1$ elementos. Toda vez que houver perda do sinal, um novo termo é adicionado a este vetor de ambiguidades n para cada satélite/receptor envolvido nesta perda de sinal. No posicionamento por ponto preciso (PPP) utilizando a fase da onda portadora, o vetor de ambiguidades será composto por n termos, sendo n o número de satélites visíveis. Novamente, toda vez que houver perda do sinal de um satélite, um novo termo é adicionado ao vetor de ambiguidades N .

O vetor de ambiguidades é, teoricamente, composto por números inteiros. No entanto, no contexto do ajustamento de observações, ele será estimado como um vetor de números reais, associado a uma respectiva MVC (matriz de variância e covariância). Essa solução obtida pelo ajustamento convencional com números reais é chamada de solução flutuante (*FLOAT*). A solução das ambiguidades como um vetor composto de números inteiros, denominada de solução fixa (*FIXED*), constitui um dos problemas mais pesquisados na área do posicionamento GNSS. Esse processo é denominado de solução da ambiguidade.

Como visto, o tempo de coleta (rastreamento de dados) é algo fundamental para a solução das ambiguidades, devido a alteração na geometria dos satélites. Porém, já existem técnicas modernas de solução quase instantânea da ambiguidade (técnicas *on the fly*), como por exemplo, o método LAMBDA. A solução do vetor de ambiguidades (N) envolve basicamente três passos:

1) No primeiro passo, estima-se a solução no espaço dos números reais, que com a sua respectiva MVC, permite construir um espaço de procura (solução flutuante);

2) No segundo passo, a partir do espaço de procura, o vetor de ambiguidades correto deve ser identificado, ou seja, deve ser encontrado os seus valores inteiros. Nessa etapa é feita a validação ou não da solução inteira obtida (solução fixa);

3) No terceiro passo, caso o vetor N for solucionado e validado como inteiro, o ajustamento é realizado novamente, com a introdução das ambiguidades solucionadas (solução fixa), para se obter as coordenadas (X,Y,Z) dos pontos levantados.

Caso as ambiguidades tenham sido solucionadas como números inteiros corretamente, a nova solução para as coordenadas da estação será de alta acurácia. No caso de dúvidas na solução das ambiguidades, é preferível aceitar a solução inicial (*FLOAT*) do que uma solução fixa (*FIXED*) errada (Figura 8.2).

Efeitos ionosféricos, troposféricos, de multicaminho do sinal, a geometria (configuração espacial) dos satélites, o tempo de rastreamento, o tamanho da linha-base, a interferência de outras fontes de rádio, dentre outros fatores, afetam a solução das ambiguidades. Desta forma, as técnicas de solução das ambiguidades devem considerar todas estas questões, dentre outras.

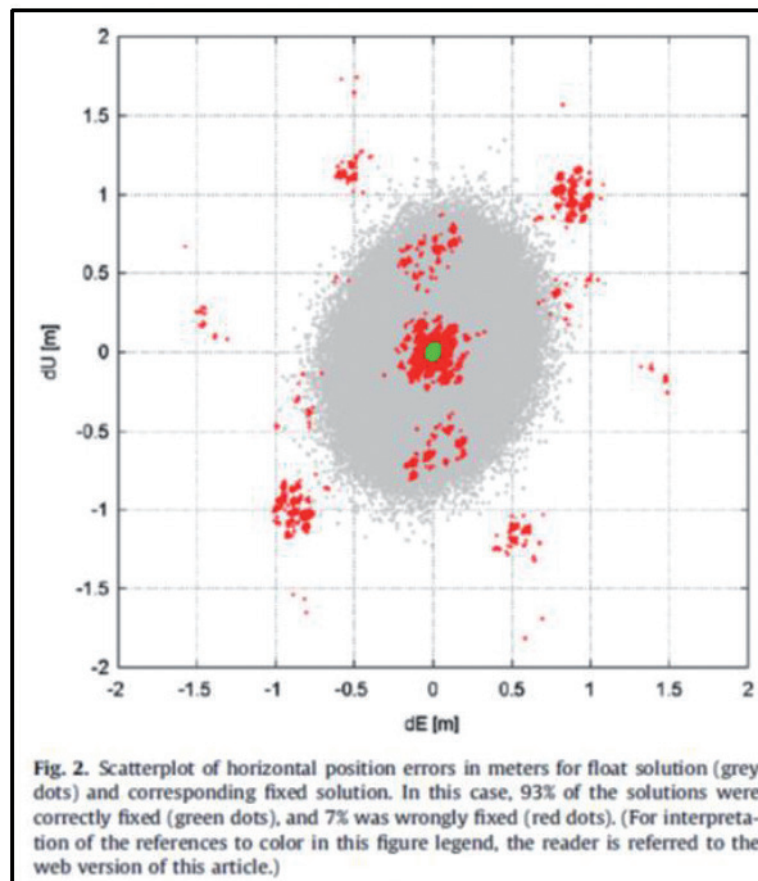


Figura 8.2 – Erro posicional planimétrico (em metros) para soluções fixas corretas (em verde), fixas erradas (em vermelho) e flutuantes (em cinza).

8.1. TÉCNICAS DE SOLUÇÃO DAS AMBIGUIDADES

Existem várias técnicas (métodos) para a solução das ambiguidades, como por exemplo, a longa ocupação, de pelo menos 30 minutos, em um mesmo ponto, alterando a geometria (configuração espacial) dos satélites visíveis, sendo denominada de método geométrico. O rastreamento contínuo das fases da onda portadora resulta na determinação de diferenças de ambiguidades. Estas são usadas numa solução Doppler para determinar as coordenadas da antena do receptor. Diferenças de ambiguidades de pseudodistâncias entre a antena do receptor e o satélite podem ser derivadas desta solução, e comparadas com as observações de diferença de ambiguidades das fases da onda portadora. As ambiguidades são diretamente obtidas desta comparação. Para que o método geométrico seja aplicado, a mudança na geometria dos satélites deve ser suficientemente larga, ou seja, um longo período de observação é exigido, devido à alta correlação temporal e espacial existente entre as ambiguidades da primeira época de observação. Se o receptor perder o sinal de um ou mais satélites e o número de satélites restantes for menor do que quatro, um novo valor inicial para as ambiguidades é introduzido. Este é o problema da perda de ciclo. As ambiguidades estimadas em um primeiro ajustamento são números reais (solução flutuante), elas são então convertidas para números inteiros (solução fixa) se os valores estimados (reais) estiverem muito próximos de um número inteiro, ou, em outras palavras, se o erro posicional relativo na direção do satélite for menor do que meio comprimento de onda (no caso da portadora L1, por exemplo, menor do que 9,5 cm). Isto requer um longo período de observação. Uma redução no tempo de rastreamento é possível com o rastreamento de mais satélites, uma melhor geometria (configuração espacial dos satélites), ou quando ondas portadoras com maior comprimento de onda são utilizadas.

Outro método, muito utilizado no início do desenvolvimento do PR, é a técnica de troca de antenas (*swap antennas*), a qual consiste em instalar um receptor GNSS em um ponto de coordenadas conhecidas, e o outro receptor GNSS em uma estação próxima, entre 2 a 5 metros. Coletam-se dados por pelo menos uma época de observação e então as antenas são trocadas, sem perder a sintonia com os satélites, ou seja, os receptores permanecem ligados, coletando-se então novamente dados de pelo menos uma época de observação com as antenas trocadas (Figura 8.3). Não havendo perdas de ciclos, as ambiguidades antes e depois da troca de antenas nos dois receptores são as mesmas, e, combinando as equações de observação envolvidas antes e depois da troca de antenas, os valores das ambiguidades podem ser determinados.

Neste caso, a geometria entre as estações e os satélites foi alterada ao se fazer a troca de antenas, razão pela qual as ambiguidades podem ser solucionadas rapidamente. Esse procedimento foi um dos primeiros que permitiram realizar posicionamento geodésico com precisão centimétrica em um pequeno intervalo de tempo de coleta de dados, mas trata-se de um procedimento que não é mais adotado na prática.

Outro método que pode ser utilizado é a ocupação de dois pontos com coordenadas conhecidas (técnica da linha-base conhecida). Neste caso, como se conhecem as coordenadas das duas estações ocupadas, os parâmetros a se determinar no ajustamento são apenas as ambiguidades, o que pode ser realizado instantaneamente.

No PR, o número de ambiguidades a ser considerado depende do número de satélites rastreados e do espaço de procura das DDs das ambiguidades. Por exemplo, se a janela de procura para cada ambiguidade for de 6 ciclos (ou seja, ± 3 ciclos), estando disponíveis 6 satélites (isto é, 5 DDs), o número de combinações a ser testado é $6^5 = 7776$. Se, ao invés de 6 ciclos, a janela for de 7, este número aumenta para $7^5 = 16807$. Logo, fica evidente que a solução do problema não é obtida analisando todas as possíveis soluções, mas pela adoção de uma estratégia apropriada.

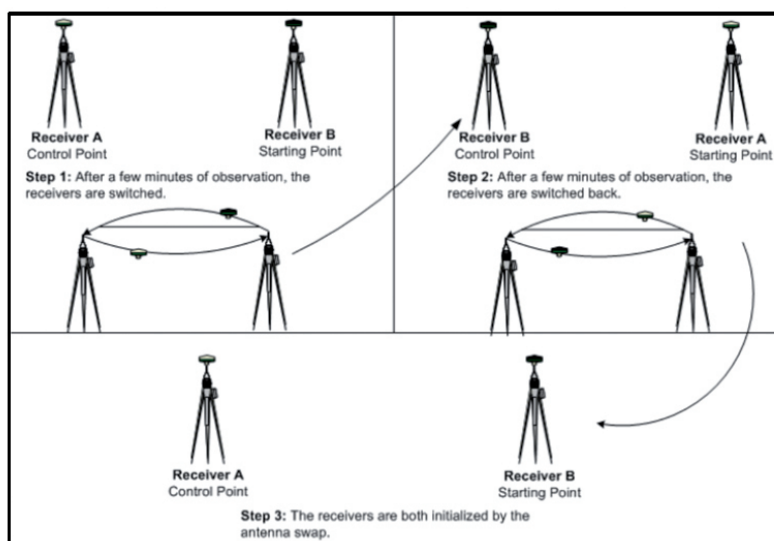


Figura 8.3 – Método da troca de antenas (*swap antennas*).

Atualmente, existem métodos de solução quase instantânea (técnicas *on the fly*) para a solução das ambiguidades, sendo o método LAMBDA (*Least-squares AM-Biguity Decorrelation Adjustment*) o mais conhecido e utilizado. A técnica LAMBDA requer como dados de entrada apenas as ambiguidades estimadas (reais) e a sua respectiva MVC. Logo, mesmo quando outros parâmetros estão sendo estimados simultaneamente, como coordenadas da estação, erros dos relógios dos receptores e etc., esta técnica pode ser aplicada em tempo real, como por exemplo, no caso do RTK (Figura 8.4).

O núcleo central da técnica LAMBDA baseia-se na reparametrização do vetor de ambiguidades (N), mediante a aplicação da transformação Z , visando obter novas ambiguidades com menor correlação (covariâncias). Supondo correlação nula entre as ambiguidades (caso ideal), a solução seria obtida simplesmente aproximando (arredondando) cada ambiguidade estimada (real) para o inteiro mais próximo. No entanto, para curtos períodos de coleta de dados e/ou linhas-base longas, tal situação não ocorre na prática.

Desta forma, as ambiguidades são decorrelacionadas por meio de uma transformação apropriada (transformação Z), aplicada sobre as ambiguidades originais, pertencentes ao espaço dos números reais. A decorrelação (redução da correlação) torna a nova região de procura bastante inferior a original, uma vez que, paralelamente a decorrelação das ambiguidades, a precisão das mesmas também melhora de forma considerável (Figura 8.5).

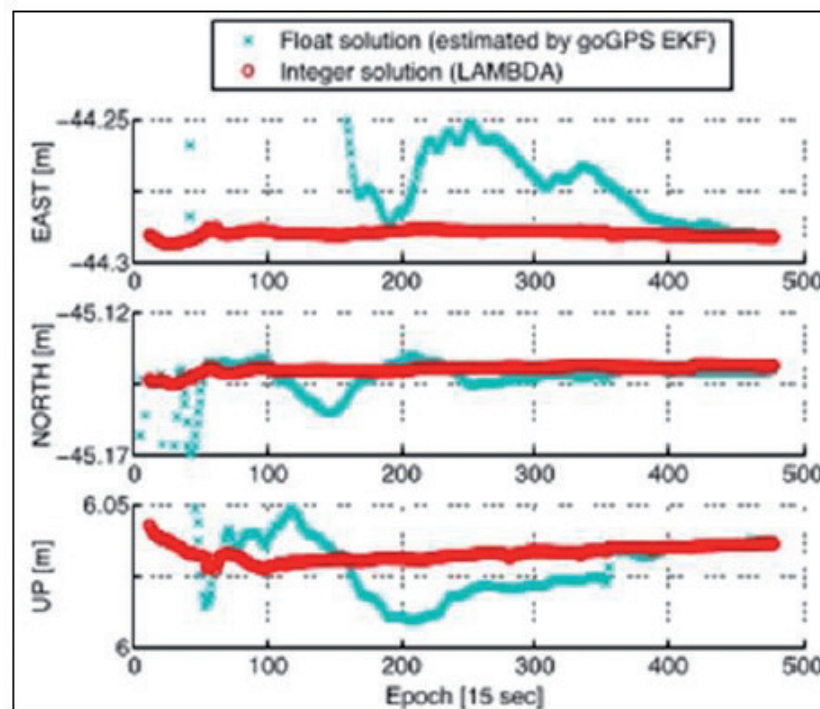


Figura 8.4 – Comparação entre o método LAMBDA e a solução flutuante em função do tempo de rastreo.

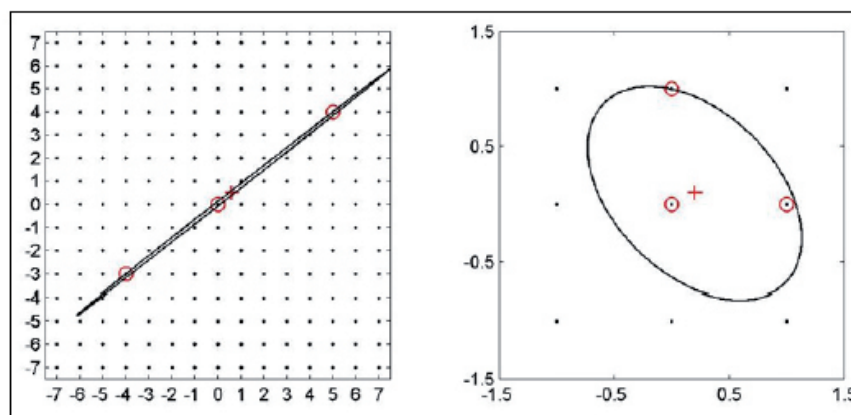


Figura 8.5 – Exemplo de aplicação da transformação Z para decorrelacionar as ambiguidades originais.

Após a aplicação da transformação Z, o próximo passo é realizar a procura, ou seja, obter o vetor de valores inteiros das ambiguidades. Uma vez encontrada a solução inteira no espaço transformado, de baixa correlação, basta transformá-la para o espaço original das ambiguidades, de alta correlação, aplicando a transformação Z inversa.

8.2. VALIDAÇÃO DO VETOR DAS AMBIGUIDADES

Para a validação da solução fixa do vetor de ambiguidades, são adotados testes de discriminação, sendo o Teste Ratio o mais aplicado. Estes testes estatísticos visam comparar a probabilidade da solução fixa considerada correta com a probabilidade de outros vetores de ambiguidades inteiras. Quando se aplica o MQI (Mínimos Quadrados Inteiros) como por exemplo, no método LAMBDA, a probabilidade da solução fixa escolhida é sempre maior do que a de qualquer outro vetor inteiro (candidato). Mas, se a probabilidade desta solução fixa não for suficientemente maior que a de outro candidato qualquer, estas duas soluções não podem ser discriminadas com confiança suficiente.

No processo de busca do vetor ambiguidade de números inteiros, acham-se candidatos-vetores para a melhor solução. Com os candidatos-vetores a solução fixa, testa-se o melhor candidato (C1) com o segundo melhor (C2). Calcula-se os resíduos entre o vetor de valores reais (solução flutuante, estimado no ajustamento convencional) e os valores inteiros (após a aplicação do MQI). Calcula-se então um indicador de qualidade entre o melhor candidato e o segundo melhor candidato. É feita então uma divisão entre o indicador de qualidade do segundo e do primeiro melhor candidato. Se o valor resultante desta divisão for maior que um número pré-estabelecido c (normalmente, $c = 3$), a solução fixa mais provável, isto é, o primeiro melhor candidato, é aceita. Logo, aceita-se o vetor de ambiguidades inteiros do melhor candidato (C1).

Desta forma, o ajustamento do posicionamento relativo (ou do PPP) é novamente realizado, introduzindo os valores das ambiguidades inteiras, melhorando a qualidade da linha-base estimada (solução FIXED). Caso contrário, adota-se a solução inicial com números reais (solução FLOAT), pois não existe confiança suficiente na melhor solução fixa, isto é, na solução mais provável C1.

Principais Referências

MONICO, João Francisco Galera. *Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações*. 2. ed. São Paulo: Editora UNESP, 2008.

WIKIPEDIA. Disponível em: < <https://www.wikipedia.org/>>. Acesso em: Abril de 2016.