

Princípios Básicos do GPS nas Medições Geodésicas

Günter Seeber, *Hannover (Alemanha)*
Verônica Maria Costa Romão, *Recife PE*

1. Introdução	2
2. Sistemas de Referência e Transformação de Coordenadas	3
3. Conceitos Básicos do Sistema GPS	4
3.1 Princípio de Navegação	4
3.2 Segmento Espacial	5
3.3 Segmento de Controle	5
3.4 Sinais GPS	6
3.5 Segmento do Usuário (Receptores GPS)	7
3.6 Grandezas de Observação e Conceitos de Cálculo	7
4. Influências de Erro e Precisão	9
4.1 Principais Fontes de Erro	9
4.2 Grandezas DOP	10
4.3 Medidas de Segurança	11
5. GPS Diferencial (DGPS)	12
5.1 Princípios	12
5.2 Navegação DGPS	12
5.3 Serviços de DGPS Preciso	13
6. Métodos Rápidos de Medição	14
6.1 Medições Estáticas e Cinemáticas	14
6.2 Cinemático em Tempo-Real (RTK)	15
7. Grupos de Usuários e Espectro de Aplicação	15
8. Sistemas Alternativos (GLONASS, GNSS)	16
9. Referências Bibliográficas	18

Prof. Dr.-Ing. Günter Seeber
Universität Hannover
Institut für Geodäsie
Nienburger Straße 5
D-30167 Hannover, Germany
E-mail: seeber@mbox.uni-hannover.de

Prof^a. Dr^a. Verônica Maria Costa Romão
Universidade Federal de Pernambuco
Depto. de Engenharia Cartográfica
Cidade Universitária
50740-530 Recife-PE - Brasil
E-mail: vcosta@npd.ufpe.br

1. Introdução

Para se entender corretamente o funcionamento e a potencialidade do Global Positioning System (GPS) é necessário deter os conceitos básicos do uso dos satélites artificiais da Terra.

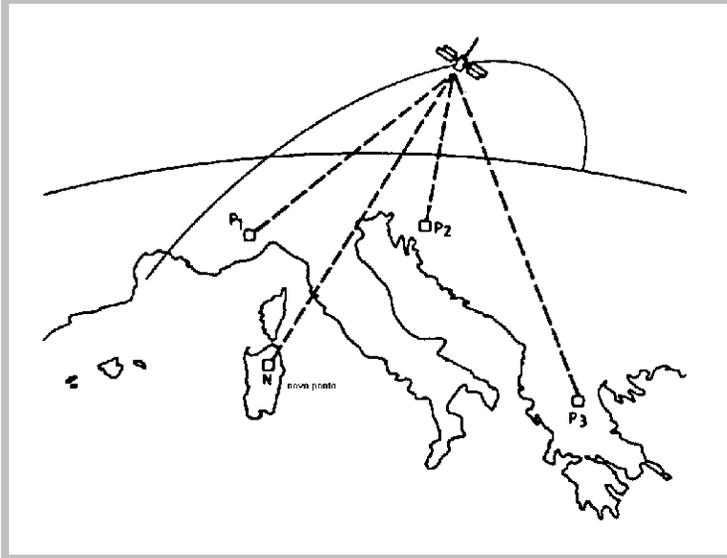


Fig. 1: Método Geométrico da Geodésia por Satélite

Nos métodos geométricos (Fig. 1), os satélites são considerados como distantes alvos “visíveis” que podem ser observados simultaneamente por diversas estações terrestres. Seguindo o conceito clássico de redes de triangulação terrestres, os satélites podem ser considerados como “vértices” de extensas redes tridimensionais. O comportamento dinâmico do satélite em sua órbita não tem importância aqui. As coordenadas de novos pontos são determinadas relativamente às posições conhecidas de estações terrestres. O método geométrico é designado como “método direto”, porque as posições dos satélites entram diretamente na solução.

Nos métodos dinâmicos (Fig. 2), os satélites são considerados como corpos de prova (sensores) no campo de

gravidade da Terra. O comportamento do satélite na órbita sob a influência de todas as forças nele atuantes tem importância essencial, porque daí podem ser tiradas conclusões sobre essas forças atuantes e, com isso, informações sobre o campo de gravidade da Terra. Em contrapartida, as órbitas dos satélites podem ser calculadas em um modelo dinâmico com base nas observações às posições do satélite a partir de estações terrestres conhecidas. Neste caso, os satélites podem ser compreendidos como “portadores de suas coordenadas”, e permitem com isso a determinação das posições absolutas de novos pontos sem amarrar a posições conhecidas de estações terrestres na vizinhança. Os métodos dinâmicos são designados como “métodos indiretos”, já que as grandezas procuradas são derivadas indiretamente das órbitas dos satélites.

Ambos conceitos geométrico e dinâmico da geodésia por satélite são, hoje em dia, compreendidos pelo uso moderno de sistemas de satélites de forma conjunta e não mais separadamente.

O uso dos satélites artificiais na geodésia deve preencher dois pré-requisitos: o estudo da representação do movimento dos satélites sob todas as forças atuantes e a descrição das posições dos satélites e usuários em sistemas de coordenadas apropriados. A seguir serão dadas as relações básicas dos sistemas de referência. Outras informações, e informações sobre movimento dos satélites, podem ser encontradas na literatura específica (por ex. Seeber 1989/1993).

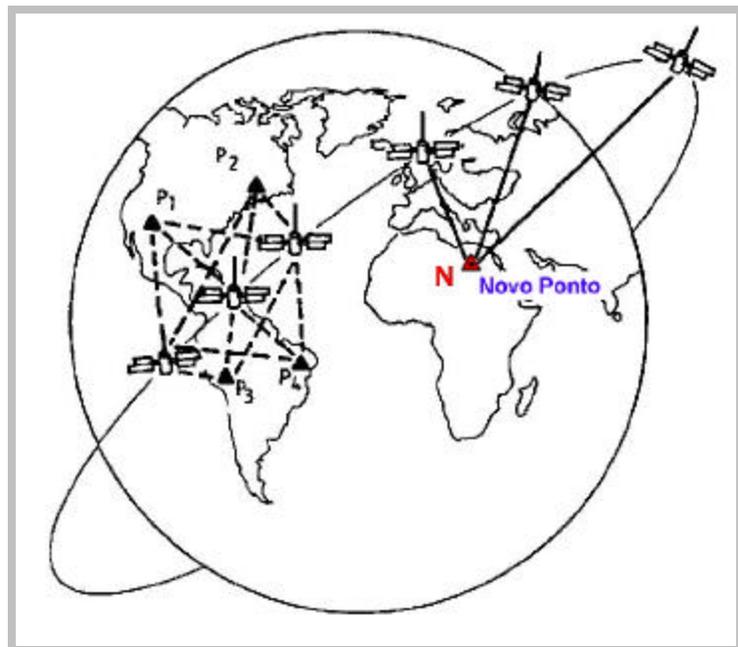


Fig. 2: Método Dinâmico da Geodésia por Satélite

2. Sistemas de Referência e Transformação de Coordenadas

De acordo com a primeira lei de Kepler, o movimento dos satélites descreve uma elipse com o centro de massa da Terra localizado em um de seus focos. É adequado, desta forma, se definir as posições do satélite em relação a um sistema de coordenadas espacial, cuja origem coincide com o geocentro (Fig.3 e Fig. 4)

Naturalmente, as coordenadas das estações de observação, cujas posições são resultantes exclusivamente das medidas aos satélites, estão referidas ao mesmo sistema de coordenadas dos satélites. Falamos neste caso de coordenadas absolutas ou geocêntricas. O sistema de referência usado para o cálculo das órbitas GPS é o WGS-84 (World Geodetic System 1984). Assim, todas as coordenadas determinadas com GPS são referidas ao WGS-84. Cientificamente falando, o datum para as coordenadas das estações é deduzido do datum do cálculo da órbita do satélite.

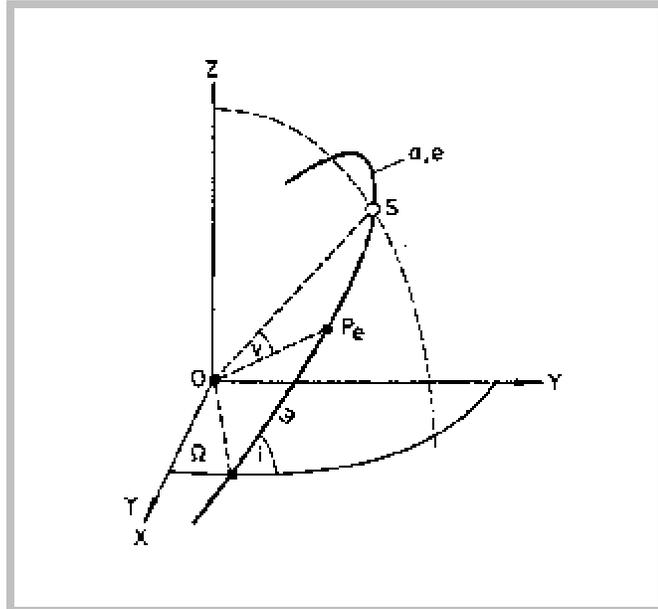


Fig. 3: Parâmetros de Kepler de uma Órbita de Satélite

Comumente o sistema de coordenadas é de tal forma disposto que o eixo Z aponta para o polo médio (convencional) e o eixo X aponta para o meridiano médio (convencional). O eixo Y forma um sistema dextrógiro.

O sistema descrito é também definido como Sistema Terrestre Convencional (CTS). A orientação dos eixos é monitorada por serviços internacionais.

Atualmente, o sistema de referência global está sendo definido por coordenadas geocêntricas altamente precisas, determinadas de um grupo de estações de observação distribuídas globalmente, com técnicas espaciais altamente precisas (Laser, VLBI, GPS). Este Sistema de Referência Terrestre do Serviço Internacional de Rotação da Terra

(ITRF) possui uma precisão de poucos centímetros e é continuamente ampliado e melhorado. O ITRF é densificado através de redes nacionais e continentais, como por exemplo através do Sistema de Referência Europeu (EUREF) e do Sistema de Referência Alemão (DREF). Tanto o WGS-84 como o ITRF e seus níveis de densificação são sistemas geocêntricos.

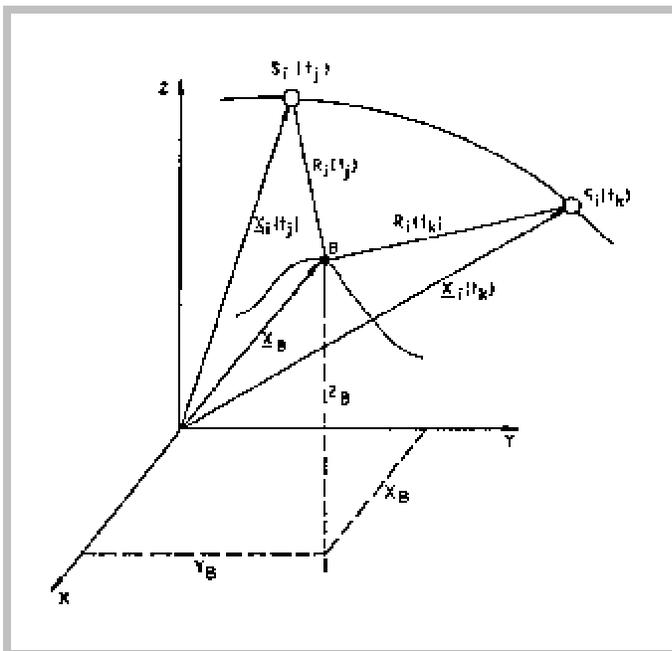


Fig. 4: Sistema Geocêntrico Tridimensional da Geodésia por Satélite

Com a introdução das medidas de segurança (cf. 4.3), a precisão nas observações GPS absolutas isoladas podem atingir 50 a 100 m. Desta forma, não faz sentido, por exemplo, transportar os resultados de observações GPS isoladas com parâmetros de transformações oficiais para o sistema local, porque a imprecisão original permanece em toda sua extensão. Para os trabalhos na geodésia, é portanto fundamental que para cada projeto GPS se conduzam observações simultâneas nos pontos onde as coordenadas absolutas e/ou coordenadas no sistema local são conhecidas.

Com isto, o datum é deduzido não das órbitas dos satélites mas das coordenadas de estações vizinhas.

Como as coordenadas cartesianas para tarefas práticas, especialmente para aplicações na engenharia, são pouco explícitas, elas são normalmente transformadas em coordenadas elipsoidais. Os parâmetros elipsoidais (semi-eixo maior e achatamento) podem ser escolhidos de tal forma que o elipsóide se ajuste o mais possível à figura total da Terra. Quando, além disso, a origem coincide com o centro de massa da Terra, fala-se de sistema elipsoidal global. O Sistema de Referência Geodésico 1989 (GRS 80) contém tal elipsóide, e o elipsóide que é agregado ao WGS-84 emprega esses mesmos parâmetros. As coordenadas no WGS-84 podem ser semelhantemente representadas na forma cartesiana ou elipsoidal.

Para as tarefas da geodésia clássica, os parâmetros do elipsóide eram escolhidos de forma que melhor se ajustasse a uma dada região (País ou Continente) (Fig. 5). Normalmente, tratava-se de um elipsóide local, e não de um elipsóide geocêntrico. A relação entre tais sistemas, local e geocêntrico, se chama Datum Geodésico. Caso os eixos dos sistemas local e geocêntrico sejam paralelos, ou que para aplicações em pequenas áreas sejam considerados paralelos, bastam neste caso tres parâmetros de translação, as constantes ΔX , ΔY , ΔZ . No caso geral, precisa-se incluir ainda tres ângulos de rotação e um fator de escala para que a fórmula de transformação completa contenha 7 parâmetros. Os parâmetros para a transformação entre datums podem ser determinados quando são conduzidas observações GPS simultâneas em, no mínimo, tres pontos com coordenadas no sistema local conhecidas. Em geral, essas transformações entre datums são conduzidas com sistemas cartesianos. Para a transformação em coordenadas elipsoidais existem fórmulas-padrão à disposição (p. ex. *Torge 1991, Seeber 1989*). Novos pontos GPS devem ser forçosamente ligados através de observações GPS aos pontos de redes terrestres existentes, e todos os resultados GPS a serem transformados precisam ser ligados entre si através de ocupação simultânea em pelo menos dois pontos. A aplicação de parâmetros de transformação existentes para novas observações GPS isoladas só é possível quando a precisão requerida é baixa.

3. Conceitos Básicos do Sistema GPS

3.1 Princípio de Navegação

O NAVSTAR GPS (NAVigation System with Time And Ranging Global Positioning System) é um sistema de navegação por satélites que fornece a usuários adequadamente equipados informações precisas das posições tridimensionais e de navegação, bem como informações de tempo. A disposição dos 24 satélites com alturas orbitais em torno de 20.000 km é constituída de tal forma que de qualquer lugar da superfície da Terra e a qualquer tempo um mínimo de quatro satélites se encontra acima do horizonte.

O GPS é originalmente um sistema de navegação militar e não foi desenvolvido para tarefas geodésicas. O princípio básico de navegação baseia-se na medida da chamada pseudo-distância entre o usuário e quatro satélites (Fig. 6). A determinação da distância “antena do receptor - satélite” se dá através da correlação dos sinal do satélite (código) com uma cópia do código produzida no receptor. Na realidade são comparados entre si os tempos de envio do sinal no satélite e o tempo de recepção pelo receptor do usuário. Como os relógios do satélite e do receptor não são sincronizados entre si, a distância que é derivada do tempo de percurso do sinal através da multiplicação pela velocidade de propagação do sinal c contém ainda um erro sistemático (erro do relógio). Este erro de sincronização é a causa da denominação pseudo-distância.

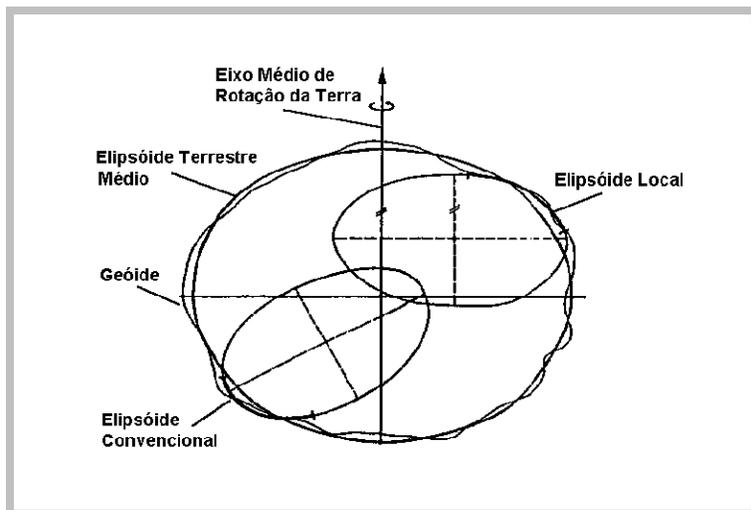


Fig. 5: Elipsóides Global e Local

Partindo-se de coordenadas conhecidas do satélite em um sistema de referência geocêntrico (p.ex. WGS-84), as coordenadas da antena do usuário podem ser derivadas. Além das tres coordenadas da estação precisa ainda ser determinado o erro de relógio. Com isso a determinação da posição se dá em princípio através de medida simultânea de pseudo-distâncias a quatro satélites. Os modernos receptores, e também os receptores simples de mão, conduzem os cálculos das posições praticamente em tempo-real, tanto que com uma taxa de por exemplo 1 Hertz a cada segundo uma posição é determinada. A equação de observação básica é muito simples (cf. também Fig. 4)

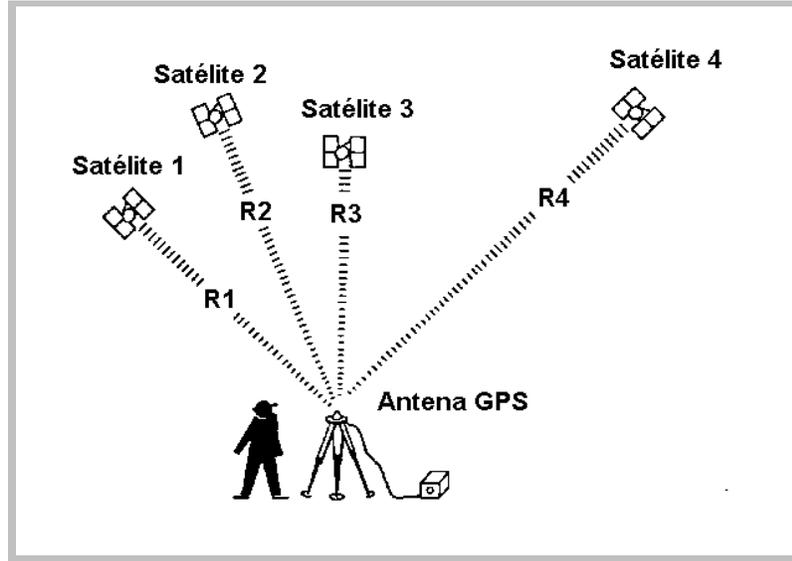


Fig. 6: Princípio Básico da Determinação da Posição e Navegação com GPS

$$Pr_i = |X_i - X_B| + c\Delta t_u = ((X_i - X_B)^2 + (Y_i - Y_B)^2 + (Z_i - Z_B)^2)^{1/2} + c\Delta t_u \quad (1)$$

Aqui, $(X, Y, Z)_i$ significam as coordenadas do satélite, $(X, Y, Z)_B$ as coordenadas do observador, Pr_i a pseudo-distância medida e $c\Delta t_u$ o erro de sincronização.

Os receptores modernos possuem muitos canais de recepção, oferecendo a possibilidade de que sejam utilizados simultaneamente os sinais de todos os satélites visíveis. O processamento simultâneo dos sinais medidos do maior número possível de satélites é de especial importância para as aplicações dos métodos rápidos de levantamento.

3.2 Segmento Espacial

Atualmente a constelação GPS é composta de 24 satélites do Bloco-II e Bloco-IIA. O primeiro satélite do Bloco-II foi lançado em 1989. Com o 24º satélite lançado em março de 1994, o Sistema foi declarado com capacidade operacional total (Full Operational Capability - FOC). Por causa da alta robustez e confiabilidade dos satélites, não foi necessário até o momento se utilizar os satélites de reserva em órbita. No decorrer deste ano (1996) se iniciarão os lançamentos dos satélites do Bloco-IIR, que substituirão os satélites do Bloco-II e IIA. Em 2001 uma outra geração de satélites GPS, Bloco-IIF, deverá dar continuidade aos satélites do Bloco-IIR. Com isso, o GPS estará à disposição por mais 15 a 20 anos como um sistema de levantamento geodésico. Com um mínimo de 24 satélites, são visíveis simultaneamente acima do horizonte, de acordo com a posição geográfica do observador, em geral de 6 a 8 satélites.

Já que com observações GPS se trata em essência de medida de tempo, os satélites GPS são equipados com osciladores altamente precisos. Os satélites do Bloco-II conduzem relógios atômicos de rubídio e césio, e para os do Bloco-IIR estão previstos osciladores ainda mais precisos de Hidrogênio-Maser.

3.3 Segmento de Controle

As tarefas do segmento de controle são:

- controle do sistema do satélite;
- determinação do tempo do sistema GPS;
- pré-cálculo dos dados orbitais dos satélites (Broadcast Ephemeris);

- armazenamento das informações orbitais e de tempo na memória de cada satélite.

Isto é feito por uma rede global de cinco estações monitoras. A estação de controle principal se encontra em Colorado, nos Estados Unidos da América. Como o GPS é um sistema militar, fica exclusivamente sob a responsabilidade e controle do Ministério de Defesa dos Estados Unidos (Department of Defense - DoD). As declarações oficiais sobre a disponibilidade civil do Sistema com a precisão de navegação garantida oficialmente (cf. *item 4*) estão indicadas no Federal Radio Navigation Plan (1994).

Diversos serviços de informações comerciais, científicas ou públicas estão se formando por todo o mundo para tornar disponível essas informações aos usuários civis. Como exemplo, temos o GIBS-Serviço do Instituto de Geodésia Aplicada em Frankfurt (Weber 1992), o International GPS Geodynamics Service (IGS) (Beutler 1996) ou a Rede de Estações de Referência da Secretaria de Levantamentos Geodésicos (Hankemeier 1995)

3.4 Sinais GPS

Nas observações GPS se trabalha com 3 tipos de sinais: portadoras, códigos e dados. Partindo da frequência fundamental 10,23 Mhz do oscilador do satélite, são derivadas duas portadoras da banda L, L₁ e L₂, com comprimentos de onda em torno de 20 cm. A essas portadoras são sobrepostos dois sinais de códigos (Fig. 7), o código preciso P sobre L₁ e L₂, e o código C/A, menos preciso, somente sobre L₁. No caso dos códigos, trata-se dos chamados códigos PRN (Pseudo Random Noise), uma sequência de +1 e -1. Adicionalmente o sinal de dados é modulado com uma frequência de 50 bits por segundo e um comprimento de ciclo de 30 segundos.

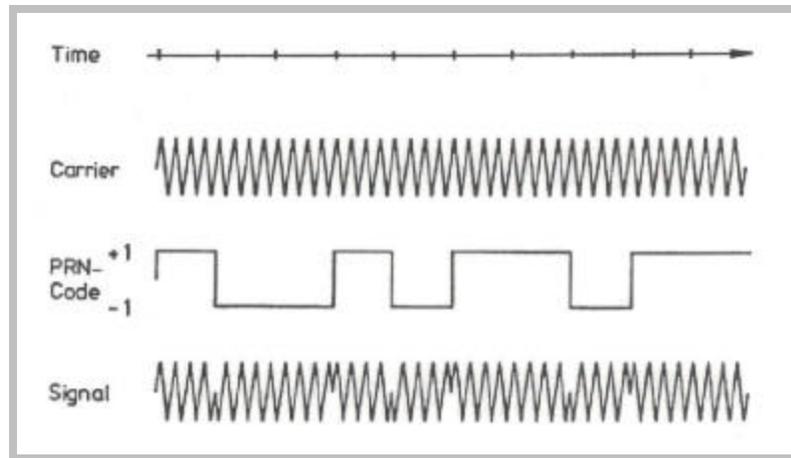


Fig. 7: Sinais do Código e Portadora no GPS

	Código	Portadora
Comprimento de onda	Código P Código C/A	L ₁ : 19,05 cm L ₂ : 24,45 cm
Ruído do Sinal: receptores clássicos	Cód. P 0,6-1 m Cód. C/A 5-10 m	1-3 mm
desenv. modernos	dm	<0,2 mm
Propagação dos sinais	retardo ionosférico	aceleração. ionosférica
Ambiguidade	não ambíguo	ambíguo

Tab. 1: Principais Propriedades das Fases do Código e da Portadora

A Tabela 1 esclarece as relações. A navegação propriamente se dá normalmente com a ajuda da medida do código, porque aqui através da técnica de correlação (cf. *item 3.4*) podem ser determinadas em tempo-real pseudo-distâncias sem ambiguidade.

A precisão da medida é de alguns decímetros a metros, por causa do ruído do código. É claro que para aplicações precisas em geodésia o uso das ondas portadoras é necessário. Na medida da fase da portadora se pode ter hoje uma resolução de 1 mm. Se se consegue resolver o problema da ambiguidade, isto é, se determinar o número total de ciclos na distância satélite-observador (cf. *item 3.6*), então se pode esgotar o alto potencial de precisão do GPS. Quando as influências dos erros podem ser dominadas (cf. *item 4*), o GPS interessa também como métodos de

medida de precisão nos levantamentos de engenharia.

Para se poder conduzir medidas de fase da portadora, o sinal da portadora precisa ser primeiro reconstruído a partir do sinal de medida. Isto acontece de forma mais simples e sem perda da qualidade do sinal através da subtração do código do sinal recebido. Como sobre a L_2 é modulado somente o código P, ele precisa ser conhecido para que a onda portadora em L_2 seja reconstruída. Com o ativamento das medidas de segurança (cf. item 4.3) o código P é normalmente bloqueado e não é acessível aos usuários civis (Anti-Spoofing, AS). É preciso, com isso, que outras técnicas sejam empregadas para que medidas de fase da portadora sejam conduzidas em L_2 .

Um método simples é o da quadratura do sinal L_2 e com isso da eliminação do sinal do código, uma vez que é composto de uma sequência de +1 e -1. Contudo, através desta técnica o comprimento de onda fica pela metade e o ruído da medida aumenta consideravelmente. Uma consequência disto é que em receptores com a técnica da quadratura, os sinais da L_2 não são frequentemente utilizáveis por causa das grandes perturbações. Todos os fabricantes de receptores geodésicos GPS tem porisso desenvolvido novas técnicas, as quais põe à disposição, também com o AS ativado, os comprimentos de onda totais da L_2 com suficiente qualidade do sinal (Breuer et al 1993).

3.5 Segmento do Usuário (Receptores GPS)

O desenvolvimento no mercado de receptores tem tomado uma velocidade sensacional nos últimos anos, de forma que não é possível e nem faz sentido apresentar aqui um resumo completo. Informações extensas se obtém através da revista "GPS World", como no número de janeiro de 1996.

Especialmente acelerado tem sido o desenvolvimento dos receptores simples que usam o código para navegação de veículos e receptores de mão, com preços na faixa de algumas centenas de dólares. Como também os serviços DGPS (cf. item 5) cobrindo grandes áreas estão à disposição, pode ser obtida com este tipo simples de receptor uma precisão nas coordenadas de 1 a 5 metros. Com o uso da medida da portadora para o alisamento da medida do código sem solução das ambiguidades, se espera num futuro próximo através desta técnica também precisão de 0,4 a 1 m (cf. Fig. 13). Em combinação com software adequado, estes receptores simples e de baixo preço comporão no futuro uma componente fundamental na coleta de dados para as aplicações de GIS (cf. item 7).

Para receptores geodésicos, os quais devem ser empregáveis em todas as tarefas de levantamentos geodésicos, valem as notas de potencialidade e de altas exigências de qualidade. Sobre os respectivos produtos atuais, pode-se obter informações em revistas específicas e em exposições relacionadas com grandes eventos específicos. Algumas propriedades importantes para estes receptores geodésicos estão abaixo relacionadas:

- ambas frequências, L_1 e L_2
- muitos canais, ≥ 8 ("all in view")
- código P em L_1 e L_2
- onda portadora completa em L_1 e L_2 sob AS
- baixo ruído da fase da portadora (< 1 mm)
- baixo ruído do código (dm)
- alta taxa de dados (> 1 Hertz, p.ex. para cinemático)
- alta capacidade de armazenamento
- centro de fase da antena estável e bem definida
- opções adicionais.

Partindo-se de um aparelho básico potente, o qual possui as citadas propriedades, os fabricantes oferecem em grande quantidade modelos especiais para aplicações especiais, onde determinadas opções são ativadas e são ligadas com software especiais. Como os produtos na sua maior parte são orientados por software, no futuro os preços para esses tipos de receptores GPS não cairão.

3.6 Grandezas de Observação e Conceitos de Cálculo

Por causa das múltiplas influências de erro no uso do GPS (cf. item 4), é necessário, basicamente para aplicações em geodésia, conduzir observações relativas em no mínimo dois pontos. A diferença na precisão alcançada é da

ordem de 3 a 4 classes de grandezas. Enquanto a determinação das coordenadas absolutas com GPS possui precisão em torno de 100 m por causa das medidas de segurança (cf. item 4.3), a precisão relativa entre dois pontos medidos pode ficar em 1 cm ou melhor. Por esta razão numerosos programas comerciais processam não as grandezas de observação originais das estações isoladas mas as chamadas duplas diferenças como grandezas de observação entre as respectivas estações de observação (Fig. 8). Como resultado são calculadas as componentes do vetor-base (linha de base) entre as estações participantes. As linhas de base podem ser acrescentadas num passo final do cálculo de rede, onde as correlações devem ser observadas, se mais que duas estações foram simultaneamente observadas.

A principal vantagem está na pré-eliminação e redução de erros comuns que afetam as estações participantes. Isto ocorre com o erro dos relógios do satélite e do receptor envolvidos. O erro referente ao retardo do sinal na ionosfera e na troposfera é mais reduzido quanto mais próximas uma da outra estão as estações (cf. item 4.3). A equação de observação para duplas diferenças é escrita, em notação simplificada, como

$$\nabla\Delta\Phi = \nabla\Delta R - \nabla\Delta d_{ion} - \nabla\Delta d_{trop} - \lambda \nabla\Delta N + \epsilon_{\Phi}$$

com

- λ comprimento de onda da portadora
- Φ observação de fase da portadora
- R distância geométrica observador-satélite
- d_{ion} retardo ionosférico
- d_{trop} retardo troposférico
- N número inteiro da ambiguidade
- ϵ_{Φ} ruído da observação

O procedimento alternativo para o cálculo é se utilizar as observações originais de todas as estações envolvidas como medidas de fase não diferenciadas no ajustamento, onde todas as influências de erro, como relógios, órbitas, atmosfera, precisam ser calculadas como parâmetros. Este procedimento é frequentemente encontrado nos pacotes de programas científicos e é empregado com vantagem no cálculo de grandes redes.

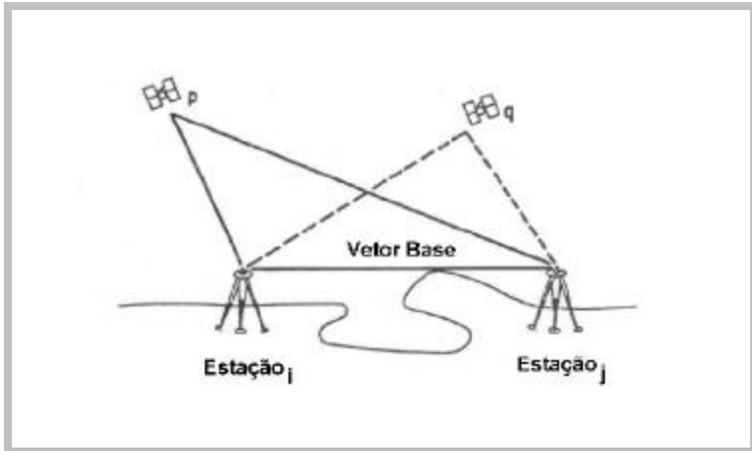


Fig. 8: Linha de Base e Dupla Diferença

Um fator primordial no uso preciso do GPS é a fixação da ambiguidade inteira na observação de fase da portadora (cf. item 3.4). Isto é válido especialmente quando tempos de observação curtos devem ser empregados. Com tempos de observação longos, de várias horas e até dias em todas as estações de uma rede, o que é possível desde que o sistema de satélites foi completado, o valor real do resultado do ajustamento da rede GPS já conduz a uma alta precisão, sem a fixação das ambiguidades. Isto é de grande vantagem no cálculo de grandes redes GPS porque para grandes distâncias entre pontos, de 50 km ou mais, a fixação rigorosa das ambiguidades se torna frequentemente muito trabalhosa por causa dos distintos efeitos da ionosfera de uma estação para outra.

Com curtos tempos de observação, como é necessário no uso operacional do GPS em regiões pequenas, não se chega a resultados satisfatórios sem a fixação das ambiguidades, porque a solução com valores reais seria muito imprecisa. Para a determinação rápida das ambiguidades foram desenvolvidos nos últimos anos potentes algoritmos. Os métodos conhecidos são a combinação do código e da fase da portadora, como as funções de procura das ambiguidades. No primeiro método, os códigos são tomados como medidas adicionais, onde é necessário um baixo ruído do código. No segundo método, se procura com a ajuda de critérios estatísticos uma área de soluções possíveis, onde a solução definitiva é escolhida. Quanto maior número de satélites disponíveis maior é a vantagem do método. Em ambos casos é mais vantajoso se determinar a ambiguidade de sinais

derivados, com maiores comprimentos de onda, que dos sinais originais, as ondas portadoras L_1 e L_2 .

Entre as possíveis combinações lineares entre L_1 e L_2 , as descritas abaixo são de especial interesse:

$$L_{\Delta} = L_2 - L_1: \quad 86,2 \text{ cm} \quad \text{Wide Lane}$$

$$L_{\Sigma} = L_2 + L_1: \quad 10,7 \text{ cm} \quad \text{Narrow Lane}$$

$$L_0 = (L_{\Delta} + L_{\Sigma})/2: \quad \approx 5,4 \text{ cm} \quad \text{sinal livre de ionosfera.}$$

A ambiguidade da Wide Lane é frequentemente resolvida com rapidez, por causa do seu grande comprimento de onda. Através do uso de condições adicionais, o comprimento de onda efetivo pode ser aumentado, até mesmo duplicado (1,72 m); fala-se neste caso da Extra Wide Lane. Com este sinal podem ser, por exemplo, frequentemente determinadas ambiguidades no posicionamento dos centros das câmaras fotogramétricas nos aviões com apenas uma medida. A desvantagem der Wide Lane está no ruído da medida que é em torno de 6 vezes maior que da medida de fase original.

A ambiguidade da Narrow Lane pode ser resolvida com segurança, por causa do pequeno comprimento de onda, normalmente apenas para curtas linhas de base (poucos quilômetros), já que o comportamento da ionosfera é idêntico para ambas estações. A vantagem da Narrow Lane é que o ruído da medida é a metade do ruído da medida da fase original.

Para o sinal livre de ionosfera, L_0 , não existe ambiguidade inteira. Por causa disso, são escolhidas frequentemente combinações de sinais com ambiguidade inteira, as quais eliminam aproximadamente as influências da ionosfera.

De especial interesse são os algoritmos que permitem a solução das ambiguidades dos dados medidos com antenas em movimento, sem necessidade de se fixar antena no início ou no fim do levantamento. Estes algoritmos se chamam On The Way (OTW) ou On The Fly (OTF). Comumente se estabelece um ponto com coordenadas conhecidas como estação de referência, enquanto que com o receptor móvel novos pontos ou trajetórias são levantados. Em pequenas distâncias para a estação de referência (poucos quilômetros), consegue-se a solução das ambiguidades depois de uma única medida ou depois de alguns segundos. Desde que os dados da estação de referência possam ser transportados por meio de telemetria para o receptor móvel, podem ser determinadas no campo coordenadas precisas dos novos pontos em tempo-real. Este métodos são denominados cinemáticos em tempo-real (Real Time Kinematics-RTK) (*cf. item 6.2*, e são também apropriados para locação de pontos através das coordenadas. Novos sistemas desenvolvidos permitem também o uso do cinemático em tempo-real entre dois receptores móveis.

4. Influências de Erro e Precisão

4.1 Principais Fontes de Erro

As principais influências de erro no GPS, como também em outros sistemas de satélites, são em geral divididos em tres grupos:

- Erros de órbita
- Erros de propagação
- Erros do receptor.

Erros de órbita são eliminados através de observações relativas em no mínimo duas estações. Permanece no entanto um resíduo nas coordenadas relativas, o qual age de acordo com a relação “distância ao satélite para linha de base”. Isto significa que um erro na órbita de 25 m para uma linha de base de 10 km acarreta um erro nas coordenadas relativas de 1 cm (relação: 1:1 milhão, 1 ppm). Como os erros nas coordenadas absolutas da estação se propagam da mesma maneira como os erros de órbita, e por causa da degradação do sinal (SA) a determinação das coordenadas absolutas pode estar com um erro de 100 m ou mais, é preciso sob essas circunstâncias se contar com uma propagação de erro de 4 ppm (4 cm em 10 km), o que para muitas aplicações geodésicas não é tolerável. Por esta razão, para aplicações precisas devem ser utilizadas rigorosamente boas coordenadas absolutas aproximadas para o ponto inicial do levantamento GPS. Se essas coordenadas não são conhecidas, é necessário se utilizar observações de referência em uma estação cuja posição absoluta seja conhecida. Se os parâmetros de transformação entre a rede nacional e o WGS-84 existem, estações conhecidas da rede nacional podem também

ser empregadas. Em nenhum caso se deve utilizar as coordenadas absolutas obtidas de uma medida GPS, porque a realização do WGS-84 através de observações só é possível com uma precisão da ordem de 100 m (cf. item 3).

A precisão das efemérides transmitidas pelo satélite (Broadcast Ephemeris) é da ordem de 5 m sem SA ativado, e da ordem de 10 a 40 m com SA ativado (cf. item 4.3). De acordo com a relação citada anteriormente (“distância ao satélite para linha de base”), a precisão citada acima é suficiente para distâncias entre estações de até 5 ou 10 km, quando a precisão exigida nas coordenadas é de 1 cm. Para distâncias maiores é necessário proceder a um melhoramento da órbita durante os cálculos, por exemplo através do uso de pontos de controle precisos, ou do uso das efemérides precisas. Tais efemérides, com uma precisão de poucos decímetros, são obtidas através do Serviço IGS, duas semanas depois, pela Internet (Beutler et al 1996). A colocação de efemérides pré-calculadas com uma precisão de poucos metros no tempo das observações está em preparação pela IGS. Com isso pode-se preencher, com a ajuda das efemérides do IGS, todas as exigências na Geodésia sobre os dados orbitais.

Os erros de propagação essenciais (Fig. 9) se originam na alta ionosfera, na baixa troposfera e nas imediações da antena através do Multipath. A ionosfera é um meio dispersivo para micro-ondas, isto é, a propagação do sinal é dependente da frequência. Através da medida em duas frequências se pode calcular a influência da propagação da ionosfera e eliminá-la em grande parte. Esta é a razão porque os sinais GPS são enviados em duas frequências. Nas medidas relativas o termo principal de influência da ionosfera é eliminado através da diferença. Se se utiliza receptores de uma frequência, então precisa-se contar, em tempos de ionosfera calma, com um erro residual de 1 ppm nas coordenadas relativas. Este erro pode aumentar em tempos de ionosfera conturbada, isto é, em tempos de alta atividade solar, principalmente nas regiões do equador geomagnético. Atualmente nos encontramos em atividade solar mínima. Mais ou menos no início do próximo século teremos novamente por alguns anos perturbações ionosféricas muito fortes. É por isso aconselhável se empregar receptores de duas frequências nos levantamentos geodésicos. Isto é também vantajoso para os poderosos algoritmos de procura das ambiguidades.

A troposfera não é um meio dispersivo para micro-ondas. A propagação do sinal na troposfera precisa por isso ser obtida através de modelos com base nos parâmetros de pressão do ar, temperatura e pressão de vapor d’água.

Em redes grandes e com longos tempos de observação pode ser de grande ajuda se utilizar um parâmetro de fator de escala no ajustamento. A experiência tem mostrado que, em geral, os dados medidos nas estações e introduzidos nos cálculos não são representativos para a área de trabalho e podem, com isso, causar erros sistemáticos. Uma troposfera modelada incorretamente influi especialmente na componente de altura. Quando o GPS for utilizado para determinação precisa de altitudes, deve ser dedicada atenção especial à influência da troposfera. Este campo carece ainda de desenvolvimento e pesquisa.

Nos arredores da antena pode ocorrer superposição e desvio de sinais causados por superfícies refletoras. Este efeito de “multipath” conduz à queda de sinais e falsificação nos resultados, os quais podem, para medidas de fase da portadora, conduzir a erros de alguns centímetros nas coordenadas. O multipath depende da disposição dos satélites empregados e indicam longos períodos de 15 a 30 minutos. Com longos tempos de observação desaparecem os efeitos. Nos métodos rápidos de medidas, cujo emprego tem crescido nos levantamentos geodésicos, os efeitos do multipath permanecem integralmente nos resultados. Por isso se faz necessário uma repetição das medidas no mínimo 30 minutos depois. É pouco aconselhável se proceder a um controle das medidas no dia seguinte a mais ou menos na mesma hora, pois a configuração dos satélites se repete

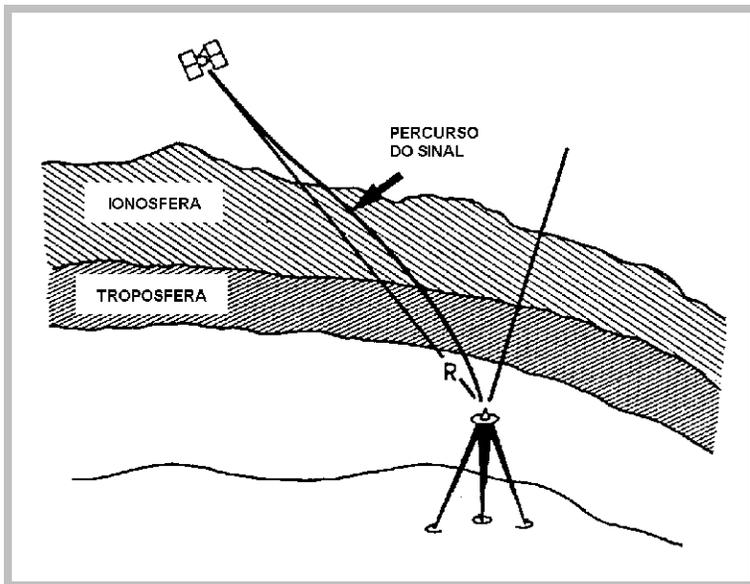


Fig. 9: Trajetória do Sinal através da Ionosfera e Troposfera

diariamente. Para minimizar os efeitos do multipath podem ser empregadas antenas especiais. As observações não devem ser conduzidas nas proximidades de superfícies refletoras.

4.2 Grandezas DOP

A precisão no posicionamento com GPS no modo de navegação depende, por um lado, da precisão da medida da pseudo-distância isolada, expressa através do seu desvio-padrão σ_r e, por outro lado, da configuração geométrica dos satélites utilizados, expressa através de uma grandeza escalar, a qual é designada na literatura de navegação por DOP (Dilution of Precision). São utilizados vários tipos de DOP. Para escalar a precisão de medida de distâncias na precisão de um posicionamento tridimensional usa-se o PDOP com

$$\sigma_p = \text{PDOP } \sigma_r$$

Pode ser mostrado que o PDOP significa o valor recíproco do volume de um tetraedro, o qual é formado pelas posições dos satélites e do usuário. Isto pode ser visto na figura 10. A melhor situação geométrica é dada quando o volume torna-se máximo e o PDOP mínimo.

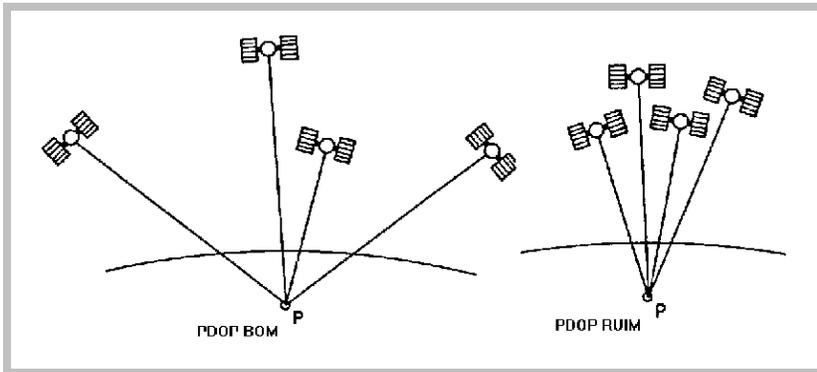


Fig. 10: Geometria do Satélite e PDOP

No início do uso do GPS o PDOP tinha muita importância no planejamento dos projetos de medições, porque com um número limitado de satélites ocorriam frequentemente constelações geométricas desfavoráveis. A cobertura de satélites hoje é tão favorável que o valor do PDOP muito raramente está acima de 5 e também somente por períodos muito curtos. Não é mais necessário por isso planejar

observações segundo o PDOP. Nas aplicações cinemáticas e nos métodos rápidos (cf. item 6) podem no entanto ocorrer, em casos isolados, situações geométricas desfavoráveis por períodos curtos de tempo, de forma que na análise de resultados críticos devem ser verificados os valores dos PDOPs. Todos os programas de planejamento e cálculo fornecidos pelos fabricantes dos equipamentos GPS incluem visualização dos valores do PDOP.

4.3 Medidas de Segurança

O GPS é um Sistema de Navegação militar e está sob a responsabilidade do Ministério de Defesa dos Estados Unidos. É por isso que desde o início do desenvolvimento do Sistema estaria disponível para os usuários civis somente uma precisão limitada do Sistema. O “serviço” acessível aos usuários civis se chama *Standard Positioning Service* (SPS) e o correspondente para os usuários “autorizados” é chamado *Precise Positioning Service* (PPS). Atualmente é garantida uma precisão de 100 m em 95% do tempo no posicionamento horizontal em duas dimensões para os usuários SPS (FRNP 1994). Os usuários PPS tem acesso à precisão total do Sistema, de 10 a 20 m em tres dimensões. As informações valem respectivamente para um receptor isolado no modo de navegação.

São ativados dois tipos de medidas de segurança, o *Anti Spoofing* (AS) e o *Selective Availability* (SA). No AS o código P conhecido é cifrado, através da sobreposição por um código W desconhecido, no protegido código Y. Somente os usuários autorizados (quase que exclusivamente militares) tem acesso ao código Y e podem com isso extrair o conteúdo completo das informações do código P.

SA usa dois efeitos para degradação da precisão do Sistema: uma manipulação dos sinais dos dados (uma deterioração das efemérides, técnica ϵ) e uma desestabilização artificial do relógio do satélite (técnica δ). Ambos efeitos produzem erros nas pseudo-distâncias medidas. A figura 11 esclarece o efeito na determinação da posição com um receptor isolado, especialmente a rápida variação do efeito com o tempo.

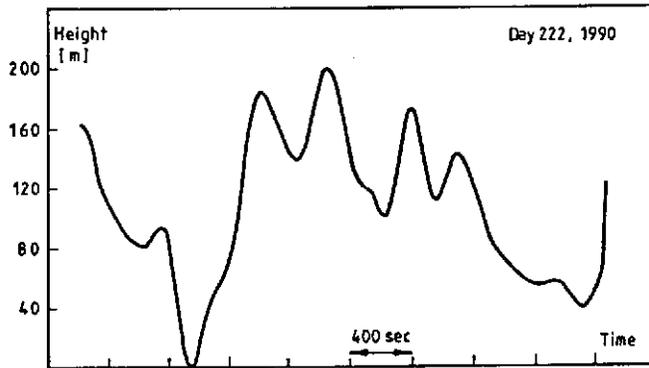


Fig. 11: Efeito da Selective Availability (SA) na Determinação das Altitudes Absolutas

Tanto o SA como o AS estão atualmente ativados, podendo ocasionalmente ocorrer desativação provisória. As discussões sobre a necessidade e o sentido dessas medidas de segurança são mantidas pela comunidade americana dos usuários, especialmente porque os efeitos em um grande número de aplicações, através de métodos DGPS (cf. item 5, podem ser completamente compensados. Não está ainda decidido se ocorrerá no futuro uma mudança na política oficial. Informações sobre o estado das discussões podem ser encontradas na revista GPS World.

5 GPS Diferencial (DGPS)

5.1 Princípios

Devido às limitações na precisão na determinação das posições absolutas decorrentes das medidas de segurança tomadas, o GPS é empregado na Geodésia quase que exclusivamente através de métodos relativos, ou seja, são determinadas diferenças de coordenadas entre duas ou mais estações. Através da diferença uma grande parte das influências dos erros é eliminada; trata-se aqui do conceito geométrico da geodésia por satélite (cf. item 1). Uma ou mais estações são consideradas como estação de referência com coordenadas conhecidas no WGS-84. No decorrer de um projeto, as estações de referência ou são ocupadas com receptores GPS próprios, ou se recorre aos dados de estações de referência permanentes em operação.

Em princípio, através de observações coordenadas das estações de referência são transportadas para as novas estações a ser determinadas. Nos últimos tempos tem-se empregado o termo DGPS a aplicações onde dados de correção da estação de referência são usados pelo usuário em tempo-real para uma melhoria na posição.

De acordo com o tipo e extensão dos dados empregados podem ser diferenciados os seguintes procedimentos:

- Uso dos dados da estação de referência para cálculos posteriores (pós-processamento)
- Uso de correções de distância da estação de referência em tempo-real (DGPS normal)
- Uso de correções de distância da estação de referência em tempo-real e alisamento da fase da portadora na estação móvel (DGPS com alisamento da portadora)
- Uso dos dados de fase da portadora da estação de referência em tempo-real (DGPS preciso).

O primeiro caso é um caso geral de aplicação do GPS em geodésia. A Figura 12 permite uma visão da precisão alcançável nos casos de b) até d).

5.2 Navegação DGPS

Os serviços DGPS são constituídos mundialmente pelos fornecedores comerciais, Órgãos responsáveis pelo tráfego aéreo, marítimo e terrestre, como também por Instituições de Geodésia. Nas estações de referência, cujas coordenadas são conhecidas, são realizadas normalmente observações a todos os satélites GPS visíveis, e da comparação entre as pseudo-distâncias medidas e as pseudo-distâncias calculadas com as coordenadas e das efemérides operacionais (broadcast) são calculadas correções de distância para cada satélite e transmitidas como sinais de correção. A usuário móvel emprega as correções para os satélites medidos por ele. Neste conceito não é necessário que a estação móvel empregue os mesmos satélites da estação de referência. A figura 13 esclarece o conceito.

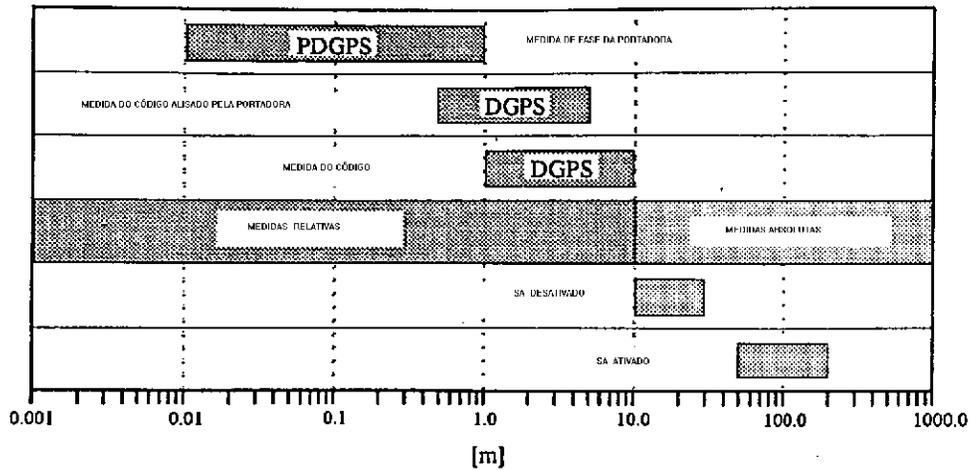


Fig. 12: Precisão Obtível com GPS Diferencial

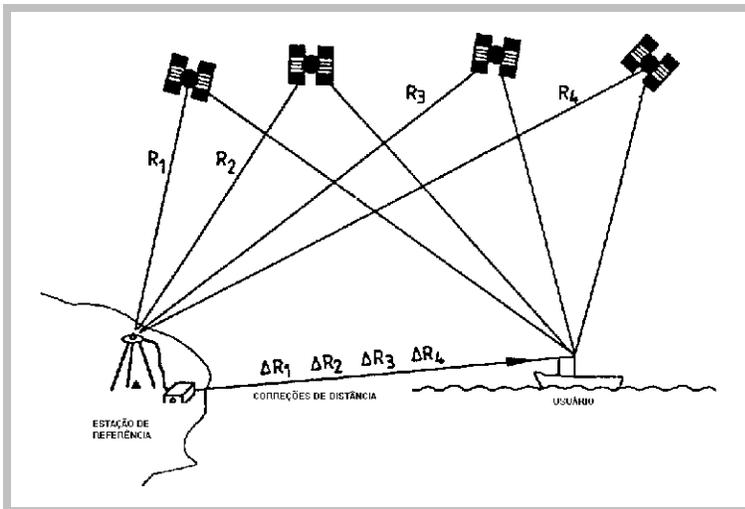


Fig. 13: DGPS com Correções de Distância

Um conceito simples de DGPS consiste em que correções de posição na estação de referência sejam calculadas e enviadas à estação móvel. Por causa do efeito-SA precisa ser assegurado que ambas estações usem os mesmos satélites para o cálculo da posição, ou do contrário erros da ordem de 10 a 20 metros podem ser originados. O conceito de correções de posição é oportunamente empregado no uso de receptores de mão para a coleta de dados descritivos para o GIS. No transporte de correções de distância é empregado um formato de dados internacional convencional, o Formato-RTCM (Radio Technical Committee for Marine Services). A taxa de transmissão é, de

acordo com o número de satélites e takt de tempo, de 50 a 200 bps (bit por segundo); de forma que os transmissores de ondas médias e longas podem ser empregados para a transmissão. A extensão importa em várias centenas de quilômetros. Para redes DGPS globais os dados de correção são transmitidos por satélites de comunicação marítima INMARSAT.

As correções DGPS são representativas até uma distância de alguns 100 km da estação de referência, desde que uma precisão relativa de poucos metros possa ser alcançada. Para grandes distâncias precisa ser calculado um modelo de erro de superfície através de observações a estações monitoras e transmitidas com os dados de correção aos usuários. Conceitos correspondentes sob a designação de Wide Area Differential GPS (WADGPS) estão em desenvolvimento.

A precisão alcançada com as correções DGPS padrão preenche em grande parte as exigências do usuário, como por exemplo nos veículos de navegação, de transporte e salvamento. Quando do lado do usuário a determinação da posição é alisada a partir de medidas do código através do emprego das informações de fase da portadora sem a solução das ambiguidades, a precisão pode ainda aumentar até uma ordem de grandeza de 0,5 m a 1,0 m se a distância à estação de referência não é muito grande (em torno de 50 km). Esta precisão é suficiente para muitas aplicações em Sistemas de Geo-informações, como por exemplo para cartas de uso do solo, cadastro de

desmatamentos florestais, etc., bem como para aplicações na hidrografia.

5.3 Serviços de DGPS Preciso

Quando a precisão exigida é da ordem do decímetro e sub-decímetro, é necessária a solução das ambiguidades das fases das portadoras por parte do usuário. Para isso, as observações de fase das portadoras precisam ser transmitidas das estações de referência para o usuário, e estar disponíveis para um cálculo conjunto com os dados do usuário em tempo-real. A taxa de dados necessária é da ordem de 2400 bps; de forma que os canais de transmissão precisam estar nas bandas do decímetro ou metro (VHF,UHF). De interesse também são as ligações com rádio móvel, como também com satélites geo-estacionários. A parte mais problemática da aplicação do conceito de DGPS preciso está na disponibilidade dos canais de comunicação. Na maioria dos Países já se trabalha hoje na apresentação de soluções apropriadas para este fim.

Na cobertura de uma área com os Serviços PDGPS precisam ser instaladas estações de referência com distâncias em torno de 50 até 70 km, as quais registram continuamente o conjunto de dados GPS geodésicos relevantes e transmitem ao usuário, ou a totalidade das informações ou em forma de quantidades apropriadas. A transmissão pode ser contínua através de rádio ou conduzida para usuários isolados segundo solicitação, como também transferido temporariamente através de canais de dados especiais. Na Alemanha, por exemplo, estão sendo atualmente instalados Serviços PDGPS pelos Órgãos de Geodésia. Uma ampla visão deste assunto pode ser encontrado em Hankemeier (1995). No Brasil está em implantação a Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC), a qual pode ser usada para o desenvolvimento de uma Wide Area Differential GPS (WADGPS). Maiores informações podem ser encontradas em Fortes (1995).

Os dados do Serviço PDGPS podem ser usados em diferentes maneiras. Um conceito muito simples está no uso dos dados armazenados para cálculo posterior das coordenadas precisas da estação do usuário. Além disso os dados podem ser usados através de uma conexão de dados para determinar, com cerca de 15-30 minutos de observação, as coordenadas precisas na área de trabalho de um receptor de referência local, ao qual pontos de detalhes podem ser ligados através de métodos rápidos de levantamento (*cf. item 5* em distâncias curtas).

Especialmente crítico é o uso do Serviço PDGPS para a determinação rápida de pontos de detalhes em tempo-real. Para isso é necessário se dispor de algoritmos potentes para solução rápida das ambiguidades em distâncias longas (*cf. Itens 3.5, 6.2*). Recentes pesquisas comprovam que as soluções OTF em distâncias até 50 km são possíveis, onde o tempo de medida necessário é de alguns minutos. Estão em preparação os métodos de medidas operacionais, em que uma rede de estações de referência são de uma enorme contribuição.

6. Métodos Rápidos de Medição

6.1 Medições Estáticas e Cinemáticas

Na concepção original o GPS foi usado ou para navegação sem determinação das ambiguidades com precisão média, ou para determinação de posição estática em redes de controle geodésicas com a determinação das ambiguidades e com objetivo de precisão centrimétrica. Para resolver as ambiguidades em aplicações estáticas, foi necessário um tempo de observação, de acordo com a distância entre as estações, de uma a várias horas. Até que Rimondi (1985) apresentou pela primeira vez métodos, com os quais era possível uma solução das ambiguidades já depois de poucos minutos de observação. Estes métodos "rápidos" foram originalmente denominados de "cinemáticos" e, de acordo com o método e aplicação, receberam nomes muito confusos. Na visão de hoje, os métodos GPS rápidos podem ser divididos em tres grupos:

- 1) métodos estáticos rápidos
- 2) métodos semi-cinemáticos (Stop and Go)
- 3) métodos cinemáticos puros (com solução OTF/OTW).

Os métodos estáticos rápidos tratam de diminuir o mais possível o tempo de medição sobre o ponto. Isso se consegue através do uso de algoritmos eficientes de procura da ambiguidade, os quais mais rápido trabalham quanto mais satélites são observados. O tempo de medição necessário depende da distância à estação de referência. Nas distâncias de poucos quilômetros, com cuidados na instalação da antena e um tempo de medição

de poucos minutos até um máximo de 15 minutos, é possível se alcançar uma precisão ≤ 1 cm. Nos sistemas de medição e cálculo antigos existe ainda a opção de se reocupar os pontos com um intervalo em torno de 1 hora entre as ocupações e observar por um período em torno de 5 minutos. Este método é também denominado de "pseudo-cinemático" e usa a alteração ocorrida na geometria do satélite entre as duas ocupações como um meio de resolver as ambiguidades. Nos sistemas mais modernos o uso dos algoritmos de procura das ambiguidades tem se intensificado, de forma que a reocupação para encontrar as ambiguidades não é mais necessária. Muitos sistemas mostram quando dados suficientes para uma solução segura das ambiguidades foram coletados.

Nos métodos semi-cinemáticos são determinadas primeiro as ambiguidades com a ajuda de um procedimento inicial, como por exemplo através da troca de antenas (Antenna Swap) sobre dois pontos vizinhos, e depois transportadas para os demais pontos, onde a antena é mantida por pouco tempo. É por isso também que é chamado método Stop and Go. Durante o transporte é preciso manter a ligação a pelo menos quatro satélites, ou do contrário é preciso voltar a um ponto anterior. A precisão dos pontos é de 1 a 3 cm, de acordo com o cuidado e a duração da ocupação.

Nos métodos cinemáticos puros é determinada a trajetória da antena. O procedimento inicial de determinação das ambiguidades não é necessário porque as ambiguidades podem ser derivadas dos dados durante o movimento da antena (Algoritmos OTF ou OTW, *cf. item 3.5*). Este procedimento é necessário para possibilitar também aplicações em aviões ou navios. As técnicas OTF/OTW tornaram-se tão potentes que também para aplicações estáticas os métodos "cinemáticos" são empregados. Isto significa concretamente que as ambiguidades não precisam ser mais transmitidas, como no método Stop-and-Go, mas diretamente resolvidas nos pontos a ser determinados, depois de alguns segundos de observação. Caso não haja suficientes satélites visíveis nos pontos para uma solução de ambiguidades rápida, a solução pode ser inicializada em uma área livre vizinha em um determinado ponto e depois com a recepção de no mínimo quatro satélites, continuada nos pontos a levantar. As técnicas OTF/OTW jogarão no futuro um papel importante crescente nos levantamentos com GPS por causa do seu emprego universal.

6.2 Cinemático em Tempo-Real (RTK)

Através do desenvolvimento das técnicas OTF tornou-se possível resolver ambiguidades em tempo-real ou quase em tempo-real, quando para isso é assegurado que os dados produzidos na estação de referência, inclusive as fases das portadoras, sejam transmitidos à estação do usuário sobre uma telemetria suficientemente potente (*cf. Item 5.3*). O método é em geral designado como Real Time Kinematic (RTK). A grande vantagem desse método diante dos demais métodos GPS é que as coordenadas definitivas do ponto são produzidas no campo e que com isso são possíveis também fazer locações por meio das coordenadas. Basicamente não é mais necessário arquivar os dados GPS originais para um processamento posterior em escritório. Em ligação com os Sistemas de Geo-informações se consegue conectar no local os dados descritivos diretamente com as informações de posição. Como as informações de posição são colocadas continuamente com alta resolução temporal (nos sistemas modernos com 5 Hertz), a tecnologia RTK apropria-se para os múltiplos trabalhos de monitoramento e manobras. Quando a estação de referência dista não mais que 2-3 km, o que ocorre em várias aplicações, as ambiguidades podem em regra ser resolvidas em tempo-quase-real depois de alguns segundos de medição. A precisão obtível é em torno de 1 cm.

A figura 14 esclarece as relações como esboço de princípios simplificados. Nas locações, os pontos-alvos são alcançados com a ajuda de um display. Nos levantamentos é preciso centrar os bastões das antenas nos pontos por um período curto de tempo. A estação de referência pode ser construída em um antigo ponto com coordenadas conhecidas.

Em muitos casos se emprega taqueômetros eletrônicos para levantamento e/ou locação, principalmente em locais desfavoráveis para o uso do GPS (como p.ex. quinas de casas, áreas arborizadas). As coordenadas dos pontos de partida para a taqueometria podem ser determinadas com rapidez e precisão através dos métodos RTK.

Todos os fabricantes de receptores GPS geodésicos têm colocado equipamentos RTK no mercado. Os sistemas são formados normalmente de dois receptores GPS, de uma telemetria para a transmissão dos dados e do software que os acompanha.

7. Grupos de Usuários e Espectro de Aplicação

O espectro de aplicações do GPS é quase ilimitado. Com a crescente potencialidade e queda dos preços dos equipamentos GPS, tem surgido sempre novos campos de aplicação, o que faz ampliar as possibilidades de trabalho para os profissionais da área.

Na Geodésia, o GPS tem sido aplicado quase que exclusivamente em métodos para determinação de pontos em redes fundamentais. Em todo o Mundo originam-se redes GPS, as quais em

conexão com o ITRF global (cf. item 2.3) formam um campo de pontos homogêneo e altamente preciso para medições de densificação e de amarração. Regionalmente, cresce o número de instalações de redes GPS como base para os Sistemas de Geo-Informações e Cadastro (Romão 1995/1996).

Um aspecto especial representa o uso do GPS para a determinação de alturas. Como o GPS fornece informações tridimensionais. As alturas GPS são alturas sobre o elipsóide e , com isso, grandezas puramente geométricas. Para a transformação em alturas definidas no campo gravitacional são necessárias informações sobre o geóide. No Brasil existe o mapa geoidal com uma precisão absoluta em torno de 2,0 m e relativa de 0,02 m/km (Cintra 1996). Na Alemanha, por exemplo, os cálculos geoidais tem precisão de 1 cm. Atualmente somente com muitas limitações o trabalhoso nivelamento geométrico pode ser substituído pelo GPS. No entanto o GPS pode ser empregado nas medições de variação de alturas, pois aqui o geóide não tem papel importante.

Nos levantamentos cadastrais o GPS tem sido empregado até agora mais na determinação dos pontos das "redes de referência cadastrais" e "redes de levantamento" (Romão et al 1996). Com a crescente propagação dos sistemas RTK, aumenta o emprego do GPS no levantamento de pontos limites de propriedades e pontos topográficos (pontos de detalhes). Em grande desenvolvimento está o uso do GPS na instalação e atualização de sistemas de geo-informações, especialmente na coleta de detalhes. Em conexão com as instalações de comunicação e informações digitais do terreno e do solo, o GPS compõe o sensor de posição para o monitoramento e orientação de máquinas nas construções. Nos levantamentos de engenharia as aplicações estão na instalação de redes de controle para as construções de todo tipo, como túneis, pontes, barragens, estradas, canais, linhas férreas, etc. Um desafio para o futuro está no aumento do nível de precisão das medidas GPS em 1 mm ou melhor. Isto exige o domínio das fontes de erros essenciais, como a influência da troposfera, a variação do centro de fase da antena e o efeito do multi-caminho (multipath). O GPS será também uma ferramenta de trabalho nos levantamentos de engenharia.

Na fotogrametria o GPS já tem hoje assumido uma posição firme. Além da determinação das coordenadas dos pontos de controle, o GPS tem sido empregado na navegação do vôo fotogramétrico e na determinação das coordenadas da câmara na aerotriangulação. Desta forma, em torno de 90% dos pontos de controle podem ser dispensados. No futuro os satélites de sensoriamento remoto transportarão também receptores GPS, para que o processamento dos dados para a confecção e atualização de cartas em Países com déficit geodésico-cartográfico seja facilitado.

Na hidrografia o GPS pode ser usado na determinação de alturas precisas dos navios de levantamento.

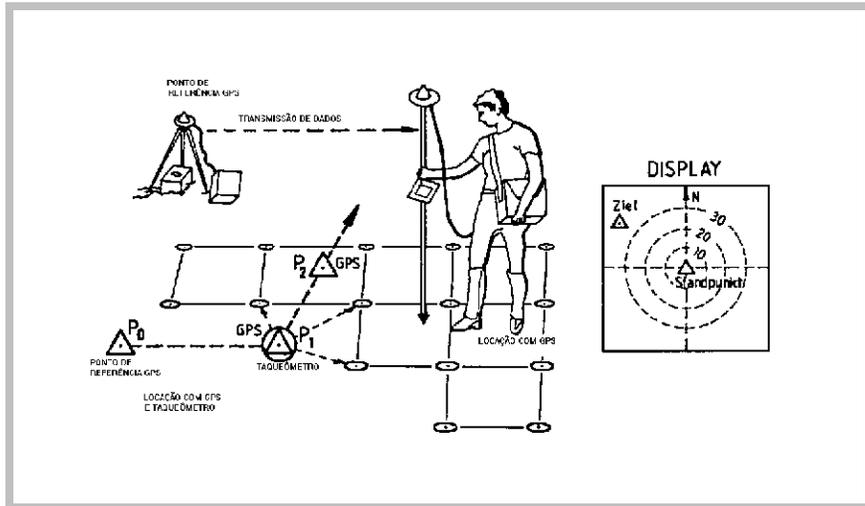


Fig. 14: Cinemático em Tempo-Real com GPS

8. Sistemas Alternativos (GLONASS, GNSS)

O GPS não é o único sistema de navegação apoiado por satélites que pode ser usado em geodésia. Na Rússia, há 20 anos vem sendo construído um sistema idêntico com o GPS chamado GLONASS (Global Navigation Satellite System). Desde fins de 1995 o sistema com 24 satélites se encontra completo. A diferença fundamental diante do GPS é que os satélites GLONASS transmitem respectivamente em frequências ligeiramente diferentes, enquanto que todos os sinais GPS são enviados nas mesmas frequências.

O GLONASS é também um sistema militar; contudo não foram introduzidas medidas de segurança, como SA e AS, de forma que a determinação da posição absoluta e navegação com GLONASS é mais preciso no momento que com GPS. Os primeiros receptores GLONASS já se encontram no mercado; eles não são no entanto tecnologicamente de qualidade comparável aos do GPS, e não são conhecidas até o momento qualquer aplicação precisa na geodésia.

O uso da combinação dos receptores GPS e GLONASS pode ser altamente eficiente, para se ter sempre disponível acima do horizonte em torno de 10 a 14 satélites simultaneamente, para os casos de obstrução dos sinais, como em áreas urbanas, e para a solução das ambiguidades. Alguns fabricantes já anunciaram o desenvolvimento destes tipos de receptores. O receptor ASN-22 combina a moderna microeletrônica ocidental com o conhecimento do sistema do sócio russo. Este receptor trabalha com sinais de 18 satélites simultaneamente (Die Welt, 6/8/1996). Até o momento não se pode ter uma prognose segura sobre a disponibilidade futura do sistema GLONASS. Notadamente apesar de todas as dificuldades econômicas, o sistema de satélites foi completado nos últimos dois anos.

Como os sistemas GPS e GLONASS são militares, cresce na Europa a discussão sobre a necessidade de se instalar um Global Navigation Satellite System (GNSS). Não se trata propriamente de um sistema novo, mas de várias componentes de sistemas, o qual inclui GPS e GLONASS. São esperados aqui num futuro próximo decisões sobre os primeiros passos nesta direção.

Num primeiro plano trata-se da transmissão ao usuário de informações sobre o status do GPS em satélites de comunicação geo-síncronos (INMARSAT) no espaço de tempo de alguns segundos. Essas informações são especialmente para tráfego aéreo de grande significado. Num segundo plano devem ser lançados possivelmente os próprios satélites europeus em órbitas de aproximadamente 6000 km de altura. É discutido também se pode ser transmitida dos satélites GPS da próxima geração uma terceira frequência, dita frequência civil.

Até o momento é incerto como o GNSS será realmente formado. Precisamos no entanto partir do fato de que tanto o GPS como sistemas de navegação por satélites devem estar disponíveis com segurança como um meio primário para a determinação de coordenadas precisas na geodésia e nas atividades de engenharia.

9. Referências Bibliográficas

- Beutler, G.; I.I. Mueller; R.E. Neilan: *The International GPS Service for Geodynamics*. In: Beutler et al.: *GPS Trends in Precise Terrestrial, Airborne, and Spaceborne Applications*. IAG Symposium No. 113, Springer Verlag 1996.
- Beutler, G.; G. Hein; W.G. Melbourne; G. Seeber (eds.): *GPS Trends in Precise Terrestrial, Airborne, and Spaceborne Applications*. IAG Symposium No. 113, Boulder, USA, July 3-4, 1995, Springer Verlag 1996.
- Breuer, G.; J. Campbell; A. Müller: *GPS-Meß- und Auswertverfahren unter operationellen GPS-Bedingungen*. *SPN Zeitschrift für Satellitengestützte Positionierung, Navigation und Kommunikation*, Heft 3, S. 82-90, 1993.
- Buziek, G.; J. Behrens; D. Egge (eds.): *Hydrographische Vermessung - Heft 14*. Schriftenreihe des DVW, v. 14 Verlag Wittwer, 1995.
- Cintra, J.P.: *O impacto do GPS na Altimetria*. Simpósio de Inovações Metodológicas e Tecnológicas - As Inovações nas Informações Territoriais, Vol. 1, IBGE, Rio de Janeiro, 1996.
- Fortes, L.P.S.: *Implantação da RBMC - Estágio Avançado*. Anais do XVII Congresso Brasileiro de Cartografia, vol. "Astronomia, Geodésia e Topografia", Salvador 1995.
- FRNP: *1994 Federal Radio Navigation Plan*. Published by Department of Defense and Department of Transportation, Washington DC, USA, 1995.
- GPS World: *News and Applications of the Global Positioning System*. Cleveland Ohio, USA, publicação mensal.
- Hankemeier, P.: *DGPS-Dienste der Vermessungsverwaltungen*. *SPN Zeitschrift für Satellitengestützte Positionierung, Navigation und Kommunikation*, Heft 3, S. 80-88, 1995.
- Heck B.; M. Illner (eds.): *GPS Leistungsbilanz '95*. Schriftenreihe des DVW, Vol. 14 Verlag Wittwer, 1995.
- Remondi, B.: *Performing centimeters accuracy relative surveys in seconds using GPS carrier phase*. Proc. 1st Int. Symp. Precise Positioning with GPS, Rockville, Vol. 2, S. 789-797, 1985.
- Romão, V.M.C.: *Der Beitrag von GPS zur Bereitstellung des Raumbezugs für Geoinformationssysteme in kartographisch wenig erschlossenen Gebieten*. Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, Hannover, 1995, 131p.
- Romão, V.M.C.: *Definição de uma Referência Espacial Única através do GPS para o Cadastro Técnico Multifinalitário (CTM) e os Sistemas de Geo-Informações (GIS) no Estado de Pernambuco*. Anais do VII Congresso Nacional de Engenharia de Agrimensura, Salvador 1996.
- Romão, V.M.C.; Carneiro, A.F.T.; Philips, J.; Silva, T.F.: *Rede de Referência Cadastral Municipal: Uma proposta do Grupo de Trabalhos sobre Cadastro Municipal (GTCM) do DECart-UFPE*. Anais do II Congresso Brasileiro de Cadastro Multifinalitário, Florianópolis 1996.
- Seeber, G.: *Satellite geodesy. Grundlagen, Methoden und Anwendungen*. Springer, 1989.
- Seeber, G.: *Satellite Geodesy Foundations, Methods, and Applications*. W. de Gruyter, Berlin/New York 1993.
- Seeber, G.; V. Böder; H.-J. Goldan; M. Schmitz; G. Wübbena: *Precise DGPS Positioning in Marine and Airborne, and Spaceborne Applications*. IAG Symposium No. 113, Springer Verlag 1996.
- Torge W.: *Geodesy* 2. ed., W. de Gruyter, Berlin/New York 1991.
- Weber, G.: *Das Deutsche GPS-Informationssystem (DZBS)*. Vermessungswesen 117, S. 556-565, 1992.