

SA : Antes e Depois de sua Desativação

Wagner Carrupt Machado, *UNESP Presidente Prudente*

João Francisco Galera Monico, *UNESP Presidente Prudente*

Paulo de Oliveira Camargo, *UNESP Presidente Prudente*

1. Introdução
2. Objetivos das Especificações
3. Conteúdo das Especificações
 - 3.1 Seções de uma especificação
 - 3.2 Conteúdo de uma especificação
4. Formação básica do Especialista em Especificações
5. Análise de alguns Tópicos de Especificações
 - 5.1 Qualidade do material fotográfico
 - 5.2 Calibração das Câmaras
 - 5.3 Resolução mínima
 - 5.4 Condições de tempo
 - 5.5 Apoio de campo para a fototriangulação e uso do GPS
 - 5.6 Detalhes topográficos e precisão/exatidão
 - 5.7 Exatidão e precisão planimétrica e altimétrica
 - 5.8 Fotogrametria e Cartografia Digital
 - 5.9 Opções alternativas mais econômicas
6. Fiscalização dos Trabalhos
7. Conclusões
8. Referências Bibliográficas

Resumo

1 Introdução

Todas as medidas estão suscetíveis à erros, os quais podem ser do tipo grosseiro, sistemático ou aleatório. No posicionamento com GPS, as medidas são obtidas à partir de sinais emitidos por satélites artificiais. Mesmo assim, os resultados estão sujeitos a várias fontes de erro. Pode-se citar os erros relacionados com a órbita, relógio do satélite, refração ionosférica e troposférica, multicaminhamento (sinais refletidos), perdas de ciclo, centro de fase da antena, relógio do receptor e a SA (*Selective Availability*).

A SA foi um mecanismo introduzido intencionalmente no sistema pelo DoD, durante o período de 4 de julho de 1994 a 1 de Maio de 2000, visando controlar o acesso à acuracidade fornecida pelo GPS, quando o usuário do SPS estiver realizando posicionamento absoluto a partir do código C/A, tendo em vista que, já no seu início, o sistema superou as expectativas de seus idealizadores, no que diz respeito à sua acurácia (MONICO, 1998).

Com essa fonte de degradação implementada, o posicionamento absoluto a partir do código C/A (*Course Acquisition / Clear Access*), passou a proporcionar acuracidade horizontal de 100

m, vertical de 140 m e de tempo de 340 ns, com 95 % de probabilidade (Van GRAAS and BRAASCH, 1996).

Os objetivos deste trabalho são apresentar as influências da SA, no posicionamento absoluto a partir do código C/A e no cálculo das coordenadas cartesianas e erro do relógio do satélite, antes e depois de sua desativação. Além disso, procura-se mostrar os efeitos oriundos do afastamento do prazo de validade das efemérides transmitidas. Para tal, as coordenadas e erro do relógio do satélite foram calculados a partir das efemérides transmitidas e comparadas com as efemérides precisas do IGS (*International GPS Service*).

Neste trabalho, uma breve revisão bibliográfica sobre mensagens de navegação, cálculo do erro do relógio do satélite e determinação da posição do satélite em sua órbita é apresentada, bem como um estudo com relação à magnitude dos erros gerados pelos efeitos da SA antes e depois de sua desativação. Além disso, um estudo sobre o comportamento das coordenadas e erro do relógio do satélite em função do afastamento do prazo de validade das efemérides transmitidas foi realizado. Para tanto, realizou-se testes em dois dias distintos, um antes e outro depois de sua desativação. Por fim, algumas considerações finais e as conclusões são apresentadas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Alguns conceitos relacionados com os assuntos abordados no trabalho são apresentados, tais como: mensagem de navegação, efeméride transmitidas, efemérides IGS, efeito SA, cálculo do erro do relógio do satélite e cálculo da posição do satélite.

2.1 Mensagem de Navegação

A mensagem de navegação, modulada nas duas portadoras L1 e L2, é transmitida continuamente pelos satélites com uma taxa de 50 bps (bits por segundo), cujas informações são fornecidas e gerenciadas pelo segmento de controle do sistema (LEICK, 1985). A mensagem de navegação é composta por um quadro com tamanho de 1500 bits e está subdividida em 5 subquadros. Os três primeiros subquadros contém 5 páginas e se repetem a cada 30 segundos, enquanto que os subquadros 4 e 5 têm duração de 12,5 minutos, pois cada um contém 25 páginas (SEEBER, 1993).

Normalmente os receptores GPS armazenam as informações da mensagem de navegação em arquivo com formato específico de cada fabricante, dificultando o intercâmbio entre dados. Porém, esse problema foi resolvido com o estabelecimento de um formato padrão, cuja denominação é RINEX (*Receiver INdependent EXchange format*) (MONICO, 1998). Os softwares que acompanham os receptores disponibilizam um módulo que permite realizar essa conversão.

2.1.1 Efemérides Transmitidas

Uma das principais funções do segmento de controle é gerar efemérides para serem transmitidas aos usuários, as quais são atualizadas e enviadas para os satélites com certa regularidade.

São considerados dados de 4 semanas anteriores ao dia de sua produção. Estes dados são utilizados para calcular as trajetórias e monitorar o comportamento dos relógios dos satélites,

os quais são propagados para o futuro. As primeiras 28 horas de predição são divididas em intervalos de 4 horas (ZUMBERGE, 1996).

Os parâmetros das efemérides e de correção do erro do relógio do satélite são referenciados, respectivamente, a uma época origem (t_{oe}) e (t_{oc}). Os elementos de cada efemérides transmitidas são válidos entre o intervalo de tempo de duas horas antes e duas horas depois de sua época origem (MONICO, 1998).

2.1.2 Efemérides do IGS

Visando dar suporte à aplicações geodésicas e geodinâmicas com utilização do GPS, uma rede com mais de 200 estações distribuídas globalmente, as quais estão equipadas com receptores de dupla frequência, é gerenciada pelo IGS (*International GPS Service*) com o objetivo de produzir e disponibilizar efemérides, parâmetros de rotação da Terra, coordenadas e velocidade das estações, informação sobre o relógio dos satélites GPS e dos receptores das estações.

Os dados coletados são enviados a sete centros de análises, cujo *Bureau Central* está localizado no JPL (*Jet Propulsion Laboratory*), Califórnia. Cada centro de análise produz uma solução e a envia ao *Bureau Central*, que exerce, dentre outras, a função de combinar tais soluções e gerar as efemérides. São geradas três tipos de efemérides, as quais são identificadas pelas seguintes siglas:

1. IGS - são as efemérides precisas, resultantes da combinação final das soluções obtidas pelos centros de análises. São pós-processadas e disponibilizadas em até duas semanas após a coleta dos dados;
- 2.
3. IGR - correspondem às efemérides rápidas, também são pós-processadas, tornando-se disponíveis a partir de dois dias após a coleta dos dados;
- 4.
5. IGP - são as efemérides preditas, disponíveis às 23:00 TU do dia anterior ao início de sua validade.
- 6.

As efemérides IGS contém, dentre outras informações, as coordenadas X, Y, Z e a correção do relógio dos satélites, calculados com intervalo de 15 minutos. As coordenadas estão referenciadas a um dos ITRFs (*International Terrestrial Reference Frame*), que é o sistema de referência melhor determinado da atualidade (MONICO, 1998).

A Tabela 1 mostra a acuracidade fornecida pelas três categorias de efemérides produzidas pelo IGS (<http://igs.cb.jpl.nasa.gov/components/prods.html>)

Tabela 1 - Acuracidade dos Produtos IGS

Produto	Efemérides (cm)	Relógio (ns)
Final	5,0	0,3
Rápida	10,0	0,5
Predita	50,0	150,0

2.2 O efeito da SA

O SPS foi planejado de maneira a fornecer acuracidade horizontal, vertical e de tempo de 100 m, 140 m e 340 ns (95%), respectivamente. Porém, testes realizados no final da década de 70 revelaram que o sistema fornecia acuracidade horizontal de 20 a 30 m (95%), ou seja, muito melhor do que o estabelecido. Desta maneira, o DoD decidiu implementar a SA intencionalmente, alegando que esta acurácia representaria problemas de segurança nacional (Van GRAAS and BRAASCH, 1996).

A SA foi introduzida no sistema através de dois mecanismos, sendo eles: a manipulação das efemérides transmitidas (técnica *épsilon*: e) e a desestabilização do relógio dos satélites (técnica *dither*: d). Ressalta-se que a implementação da técnica d pode objetivar a desestabilização física do oscilador, ou a manipulação dos parâmetros de correção do relógio enviados na mensagem de navegação, ou mesmo ambos (BIAN, 1996).

A manipulação dos elementos da mensagem de navegação deteriora a acuracidade das posições do satélite, causando uma variação lenta no erro de posicionamento do usuário, compreendendo períodos de horas. Já o período da variação posicional causada pela técnica d é da ordem de minutos. Informações sobre a acuracidade fornecida pelo GPS, no posicionamento, sob o efeito SA, ou não, são mostradas na Tabela 2 (Van GRAAS and BRAASCH, 1996).

Tabela 2 - Acuracidade do posicionamento com e sem a SA (95%)

Parâmetro	Acuracidade com SA	Acuracidade sem SA
Posição Horizontal	100 m	20 m
Posição Vertical	140 m	30 m

Visando eliminar esta degradação, algumas técnicas de posicionamento foram desenvolvidas. No entanto, é necessária a utilização de equipamentos de comunicação quando o posicionamento em tempo real for requerido, tornando-se oneroso para os usuários.

A comunidade civil vem solicitando a desativação da SA há muito tempo. Recentemente, o governo dos EUA distribuiu uma nota comunicando que esta fonte de degradação seria desativada dentro de um período de 10 anos. Finalmente, às 24 horas (TU) de 1 de maio deste ano, o DoD, em conjunto com outros órgãos, decidiram desativar esta fonte de degradação, tendo como justificativa que nos dias atuais, a SA não estava colocando em risco a segurança nacional dos EUA, além de possibilitar uma expansão no mercado consumidor.

2.3 Cálculo do erro do relógio do satélite

Embora altamente estáveis, os relógios dos satélites não acompanham o sistema de tempo GPS. Isto causa efeitos negativos no posicionamento. No entanto, os relógios são monitorados pela estação de controle GPS Colorado Springs, que calcula a diferença entre o tempo GPS e o tempo fornecido pelos relógios dos satélites (WELLS et al, 1986).

A diferença entre o tempo GPS e o tempo fornecido pelos relógios dos satélites sofre um processo de predição, sendo enviada às mensagens de navegação. Os usuários obtêm esta diferença a partir de coeficientes (a_0 , a_1 e a_2) de um polinômio de segunda ordem dado por (MONICO, 1998):

(1)

Na técnica *d*, pode-se manipular os coeficientes do polinômio (equação 1) e/ou interferir na frequência do oscilador do satélite. Portanto, quando a frequência do relógio do satélite estiver sofrendo interferências decorrentes da SA, o polinômio não modelará corretamente o seu comportamento (MONICO, 1998).

2.4 Cálculo da posição do satélite

O cálculo da posição tridimensional do satélite em sua órbita torna-se necessário, tendo em vista que as coordenadas são assumidas, geralmente, como constantes no modelo matemático (funcional). Portanto, erros inerentes a estas grandezas se propagarão diretamente na posição do usuário que realiza posicionamento absoluto (MONICO, 1998).

O procedimento de cálculo das coordenadas do satélite envolve 4 etapas, que consistem na determinação do instante de transmissão do sinal na escala de tempo GPS; cálculo da anomalia verdadeira, cálculo das coordenadas no plano orbital e cálculo das coordenadas terrestres. Detalhes acerca do cálculo das coordenadas dos satélites GPS podem ser encontrados em (LEICK, 1985), (MONICO, 1998), (HOFMANN-WELLENHOF et al, 1997), (SEEBER, 1993) e (WELLS et al, 1986).

É importante salientar que as coordenadas do satélite, obtidas a partir das efemérides transmitidas estão referenciadas ao WGS-84 (*World Geodetic System-1984*), as do IGS a um dos ITRFs. Estes dois sistemas de referência estão compatíveis no nível centimétrico, após o WGS-84 ter passado por dois refinamentos (MONICO, 1998).

3 EXPERIMENTOS E RESULTADOS

Para avaliar a magnitude do efeito causado pela SA, foi desenvolvido um programa, em FORTRAN, para calcular as coordenadas cartesianas e o erro do relógio dos satélites GPS, a partir das efemérides transmitidas. Para tal, o programa utiliza arquivos de navegação no formato RINEX como dados de entrada.

A magnitude do efeito causado tanto pela técnica *e*, quanto pela *d*, foi obtida através das discrepâncias entre as coordenadas e o erro do relógio do satélite obtidos a partir das efemérides transmitidas e das efemérides precisas do IGS. A posição e o erro do relógio do satélite foram calculados a cada 15 minutos, considerando-se as épocas das efemérides IGS como de referência.

Utilizando-se dados do satélite PRN 10, calculou-se as coordenadas e o erro do relógio, a partir das efemérides transmitidas para os dias 01 e 02 de Maio de 2000. Comparou-se os resultados com as efemérides precisas do IGS. As Figuras 1 e 2 mostram o comportamento das discrepâncias nas coordenadas do satélite com e sem a SA, respectivamente.

As Figuras 1 e 2 mostram que o comportamento das discrepâncias entre as coordenadas do satélite são similares, quer esteja sofrendo influência da SA, quer não. No entanto, as discrepâncias são maiores quando a SA está desativada, mostrando que a técnica e não era o principal mecanismo desta fonte de degradação.

A Tabela 3 mostra os valores máximos, mínimos e médios obtidos na comparação das coordenadas.

Tabela 3 - Discrepâncias nas coordenadas do satélite PRN 10 com e sem SA

Discrepâncias (m)	Coordenadas			
	X	Y	Z	
Máxima	com SA	-6,85	4,54	2,54
	sem SA	-10,13	8,06	4,14
Mínima	com SA	0,01	0,05	0,10
	sem SA	-0,03	-0,01	-0,01
Média	com SA	-0,69	0,68	0,21
	sem SA	-0,65	0,89	0,35

A partir da Tabela 3, observa-se que as discrepâncias são um pouco maiores quando a SA está desativada, ao contrário do que se esperava. Isto mostra que a técnica e não interferia significativamente no posicionamento com GPS, ou até mesmo não estava sendo utilizada.

As Figuras 3 e 4 mostram o comportamento das discrepâncias do erro do relógio do satélite PRN 10, proveniente da comparação entre as efemérides transmitidas e as precisas do IGS.

Nota-se, a partir das Figuras 3 e 4, que o comportamento das discrepâncias do erro do relógio do satélite PRN 10 apresenta-se de maneira mais instável e com magnitudes maiores, quando a SA está ativada. Além disso, percebe-se que próximo das 4 horas TU, as discrepâncias diminuíram consideravelmente, mostrando o instante em que a técnica *d* foi desativada.

Apresenta-se, na Tabela 4, as discrepâncias máximas, mínimas e médias da comparação entre o erro do relógio do satélite obtido das efemérides transmitidas e das precisas do IGS.

Tabela 4 - Discrepâncias no erro do relógio do satélite PRN 10 com e sem SA

Discrepâncias (m)	Erro do relógio do satélite	
	com SA	Sem SA
Máximo	72,67	3,82
Mínimo	-0,53	0,02
Média	-1,77	1,78

Verifica-se, a partir da Tabela 4, que as discrepâncias envolvidas com o erro do relógio do satélite PRN 10 são significativamente maiores quando a SA está ativada, mostrando que a técnica *d* era o mecanismo que efetivamente deteriorava a posição obtida pelos usuários. É importante salientar que a média das discrepâncias do erro do relógio do satélite PRN 10 sem SA, apresentada na tabela 4, desconsiderou dados compreendidos dentro do período das 0 às 4 horas TU.

Com o objetivo de fornecer uma idéia de quanto a SA influenciava o posicionamento absoluto através do código C/A, rastreou-se, durante vinte minutos, uma estação com coordenadas conhecidas no nível decimétrico. O levantamento foi realizado nos dias 10 de Maio de 1997 e 21 de Maio de 2000, sendo que em um deles a SA estava ativada, e no outro não. Na coleta de dados, utilizou-se o receptor Garmin 12 XL. Além disso, analisou-se as discrepâncias entre as coordenadas conhecidas e as obtidas através do posicionamento absoluto de cada dia. As Figuras 5 e 6 mostram o comportamento das coordenadas obtidas através do posicionamento absoluto a partir do código C/A com e sem influência da SA, respectivamente.

Observa-se que as coordenadas representadas na Figura 5 apresentam dispersões que atingem valores em torno de 90 m, enquanto que na Figura 6, onde a SA estava desativada, as coordenadas se concentram em torno de um único ponto, apresentando discrepâncias da ordem de 10 m.

A Tabela 5 mostra o desvio-padrão, o erro médio e o erro médio quadrático (EMQ) das coordenadas obtidas a partir dos levantamentos realizados, ou seja, com e sem a influência da SA.

Tabela 5 - Qualidade das coordenadas da estação, com e sem a SA

	Com SA	Sem SA		
	E (m)	N (m)	E (m)	N (m)
Precisão	22,74	18,41	1,86	2,23
Erro médio ¹	-18,23	-19,48	6,37	-4,93
EMQ ²	29,14	26,80	6,63	5,38

¹2

onde E_i é a diferença entre as coordenadas obtidas com GPS e as assumidas como verdadeiras, e n é igual ao número de épocas.

A partir da Tabela 5, observa-se que a desativação da SA melhorou cerca de 10 vezes a precisão proporcionada pelo posicionamento absoluto a partir do código C/A. O erro médio e o erro médio quadrático melhoraram algo em torno de 5 vezes.

Também foram analisados dados oriundos do cálculo das coordenadas e do erro do relógio do satélite PRN 10, dentro de um período que vai além das quatro horas do prazo de validade das efemérides transmitidas. Comparou-se os resultados com as efemérides precisas do IGS. O objetivo foi avaliar o comportamento das coordenadas e do erro do relógio do satélite em função do afastamento do prazo de validade das efemérides transmitidas. A época de origem das efemérides utilizada neste experimento era 12 horas TU, portanto, seu prazo de validade, neste caso, está compreendido entre 10 e 14 horas. Utilizou-se dados do dia 02 de Maio de 2000. As Figuras 7 e 8, mostram as discrepâncias entre as coordenadas e ao erro do relógio do satélite, respectivamente.

A partir da Figura 7, percebe-se que no período de validade das efemérides transmitidas há uma região do gráfico em as discrepâncias giram em torno de zero. Isso mostra, conforme esperado, que durante o prazo de validade das efemérides transmitidas, as coordenadas dos satélites são determinadas com um bom nível de acuracidade. Porém, fora deste prazo, as coordenadas atingem discrepâncias elevadas.

Observando-se a Figura 8, nota-se que o comportamento do erro do relógio do satélite é quase o mesmo, dentro e fora do prazo de validade das efemérides transmitidas. Isso pode ser visto com mais clareza observando também a Figura 4.

A Tabela 6 mostra as discrepâncias máximas, mínimas e médias entre as coordenadas e erro do relógio do satélite obtidos a partir das efemérides preditas e das precisas pelo IGS.

Tabela 6 - Discrepâncias entre as coordenadas e o erro do relógio do satélite fora do prazo de validade das efemérides transmitidas (efemérides transmitidas x precisas IGS)

Discrepâncias (m)	Coordenada X	Coordenada Y	Coordenada Z	dt ^s
Máximo	-294,88	316,58	-470,16	-30,86
Mínimo	-0,03	0,65	-0,16	-0,03
Média	-77,31	13,56	-62,52	0,12

A partir da Tabela 6, observa-se a importância de se utilizar as efemérides transmitidas dentro do seu prazo de validade. Os parâmetros utilizados na determinação das coordenadas do satélite não representam de maneira correta a realidade, quando estes são utilizados fora de seu prazo de validade. As diferenças inerentes ao erro do relógio do satélite, mostraram-se praticamente com mesma magnitude dentro e fora do prazo de validade.

4 CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS FINAIS

O fato da SA ter sido desativada, aparentemente não afetou a qualidade das posições dos satélites. Isso mostra que a técnica *d* e pouco influenciava na deterioração da acuracidade posicional introduzida aos usuários do SPS. Por outro lado, os efeitos advindos do erro do relógio do satélite são muito maiores quando a SA estava ativada. Isso mostra que a técnica *d* era o principal fator de degradação da acuracidade no SPS.

Da análise realizada a partir dos resultados dos experimentos apresentados nesse trabalho, nota-se que o posicionamento absoluto a partir do código C/A tornou-se cerca de 10 vezes mais preciso e com erro médio e erro médio quadrático cerca de 5 vezes melhores, depois que a SA foi desativa. Isto está coerente com o que está citado na literatura. Porém, uma maior quantidade de dados deve ser analisada para proporcionar uma conclusão mais definitiva.

A utilização das efemérides transmitidas com afastamento de 10 horas de seu prazo de validade mostrou que as discrepâncias das coordenadas e do erro do relógio do satélite apresentam discrepâncias elevadas em alguns momentos, podendo atingir valores superiores a 450,0 m. Com relação ao comportamento das discrepâncias do erro do relógio do satélite, observa-se que ele não varia muito ao distanciar-se do prazo de validade das efemérides (Figura 7). Portanto, as efemérides transmitidas não devem ser utilizadas fora de seu prazo de validade.

A partir das análises realizadas, conclui-se que a técnica *d* era, de fato, a que inseria maiores discrepâncias, apresentando variações mais rápidas se comparada à da técnica *e*, sendo a principal fonte de degradação da SA.

Embora os resultados deste trabalho foram obtidos a partir de análises de dados referentes a apenas dois dias, o que poderia fornecer apenas uma idéia pontual sobre o problema, eles confirmam o que vem sendo citado na literatura: a SA era efetivamente implementada somente através da técnica *d*.

Referências Bibliográficas

1. Y. - GPS Signal Selective Availability - Modeling and Simulation for FAA WAAS IV & V Proceedings of ION GPS-96 - Part 1: p17-26, Setembro, 1996.
- 2.
3. HOFMANN-WELLENHOF, B. ; LICHTENEGGER, H. ; COLLINS, J. - GPS Theory and Practice. Ed. Springer Wien New York, 4º Edição, Austria: p 389,1997.
- 4.
5. LEICK, A. - GPS Satellite Surveying. Ed. Wiley-Interscience, 2º Edição, EUA: p 559,1985.
- 6.
7. MONICO J.F.G. - Posicionamento Pelo NAVSTAR-GPS – Descrição, Fundamentos e Aplicações, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente – SP, 1998.
- 8.
9. SEEBER, G - Satellite Geodesy: Foundations, Methods and Applications, Ed. de Gruyter, Berlin, Alemanha: p 356, 1993.
- 10.
11. GRAAS, F. and BRAASCH, M. S. Selective Availability, In: PARKINSON B. W. and SPILKER J .J., Global Positioning System: Theory and Applications, Vol. 1, Cambridge, American Institute of Aeronautics and Astronautics: p 601-620, 1996.
- 12.
13. WELLS, D.E.; N. Beck; D. Delikaraoglou; A. Kleusberg; E.J. Krakiwsky; G. Lachapelle; R.B. Langley; M. Nakiboglu; K.P. Schwarz; J.M. Tranquilla and P. Vanicek. Guide to GPS Positioning. Canadian GPS Associates, Fredericton, N.B., Canadá, 1986.
- 14.
15. ZUMBERGE J. B. and BERTIGER W. I. Ephemeris and Clock Navigation Message Accuracy, In: PARKINSON B. W. and SPILKER J .J., Global Positioning System: Theory and Applications, Vol. 1, Cambridge, American Institute of Aeronautics and Astronautics: p 585-598, 1996.
- 16.

Wagner Carrupt MACHADO
João Francisco Galera MONICO
Paulo de Oliveira CAMARGO
Universidade Estadual Paulista - Unesp
Departamento de Cartografia - FCT/Unesp - Câmpus de Presidente Prudente
Rua Roberto Simonsen 305 CP 467 CEP 19060-900, Presidente Prudente, SP, Brasil
Fone: (018) 221-5388 Fax: (018) 223-2227
e-mail: carrupt@prudente.unesp.br

GEODÉSIA *online* · 2/2000 · [ISSN 1415-1111]
Revista da Comissão Brasileira de Geodésia