

Universidade de Brasília – UnB
Faculdade UnB Gama – FGA
Engenharia Eletrônica

Título: Subtítulo do Trabalho

Autor: Leoni Gabriel Silvestre
Orientador: Dr. Daniel Costa Araújo

Brasília, DF
2022

Leoni Gabriel Silvestre

Título: Subtítulo do Trabalho

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Eletrônica da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Universidade de Brasília – UnB

Faculdade UnB Gama – FGA

Orientador: Dr. Daniel Costa Araújo

Brasília, DF

2022

Sumário

1	INTRODUÇÃO	3
1.1	Contextualização	3
1.2	Justificativa	4
I	TEXTO E PÓS TEXTO	5
2	REVISÃO TEÓRICA	7
2.1	Estado da arte	7
2.2	Operação do <i>tracking</i>	11
2.2.1	O sinal GNSS	13
	REFERÊNCIAS	15

1 Introdução

1.1 Contextualização

Desde o início da civilização, o homem tem olhado para os astros buscando sinais. Alguns desses homens conseguiram desvendar esses mistérios das estrelas e desenvolveram formas de governar sua vida com base na localização dessas. Alguns dos primeiros observadores dos astros os utilizaram para determinar a passagem do tempo, marcando o intervalo transcorrido até que aquele astro voltasse a determinado ponto no céu; bem como para determinar a direção em que viajavam com seus grupos, usando constelações, como o Cruzeiro do Sul, para isso.

Tal necessidade de se localizar levou o homem a adotar métodos progressivamente mais elaborados e precisos de obter posicionamentos, utilizando, com o passar do tempo, telescópios, instrumentos de medição e até mesmo inserindo cálculos matemáticos em suas análises de comportamento dos astros. Porém, desde que foi possível utilizar satélites artificiais para obter esses dados, os métodos de geolocalização tomaram proporções não imaginadas por aqueles observadores que dependiam do alcance suas vistas, pois por meio desses foi possível ao homem localizar-se não apenas na porção de território em que habitava, mas localizar a si e outros em escala global. Por meio dos satélites artificiais foi possível desenvolver sistemas de posicionamento globais.

Deixando de ser dispositivos do tamanho de computadores disponíveis para militares, esses sistemas de geolocalização estão, agora, disponíveis em todos os *smartphones* e computadores pessoais. Além disso, por meio dos SDRs, *Software Defined Radio*, é possível que a modulação de transmissão, e também a demodulação na recepção, sejam feitas por meio de um software. Dessa forma, é possível substituir vários componentes analógicos por dispositivos programáveis, o que garante mais flexibilidade e adaptabilidade ao receptor de um sinal GNSS, *Global Net Satellite System*, como explica (SADIKU; AKUJUOBI, 2004).

Porém, mesmo com sua implementação em software, esses sistemas de geoposicionamento precisam continuar realizando tarefas que os sistemas tradicionais executavam a fim de obter o seu posicionamento em relação a um referencial, e uma dessas tarefas é o *tracking*, isso é, o rastreamento dos satélites que se comunicam com esse receptor. A cadeia de recepção desses sinais é como mostrada na **figura 1**. Por meio dessa é possível perceber que após passar por um tratamento inicial, onde são resolvidos fatores como ruído e modulação, o sinal segue para um bloco de aquisição e para *tracking*, e por meio desse são extraídos observáveis que permitem ao sistema estimar posição, velocidade e

tempo (PVT) relacionadas ao satélite que transmite o sinal.

Assim, o presente projeto, nascido de um PIBIC sobre técnicas de compressão e reconstrução esparsa em sinais GNSS, que visa a implementar, em SDR, a cadeia de recepção de um sinal GNSS, tem o seu escopo restrito à implementação do sistema de rastreamento para a mesma. Ao longo desse projeto serão abordados o funcionamento de sistemas de recepção de sinais GNSS, com foco no bloco de *tracking* desses e, por fim, serão apresentados e discutidos resultados obtidos por meio do rastreamento utilizando máxima verossimilhança para essas estimativas.

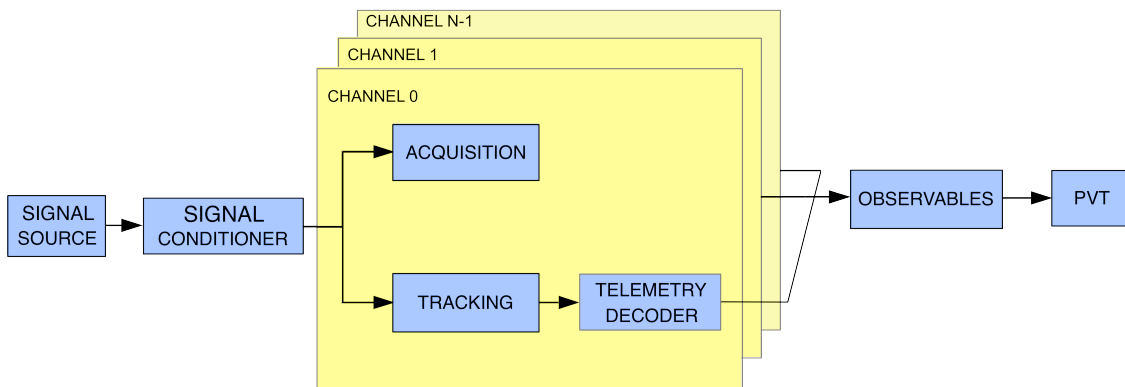


Figura 1 – Diagrama de blocos de receptor GNSS

1.2 Justificativa

A Universidade de Brasília, no Campus Gama busca implementar um receptor se sinais GNSS. Dessa forma, surge a necessidade de se criar um recptor para esses sinais.

Parte I

Texto e Pós Texto

2 Revisão Teórica

Nessa primeira parte do documento, objetiva-se explicitar com uma visão geral, os conceitos que existem por trás das aplicações de GNSS, bem como as aplicações que têm surgido a partir dessa tecnologia emergente.

Assim sendo, a primeira parte desse documento está dividida em 2 seções. Na primeira seção parte-se de um ponto de vista mais abrangente onde será exposto o estado da arte das tecnologias sistemas de navegação global por satélite, mostrando os rumos de desenvolvimento tanto de *hardware* quanto de *software* e as aplicações que têm surgido e fazem uso dessa tecnologia e suas técnicas.

Em seguida será abordado como de fato funciona o sistema de *tracking* para o sistema GNSS considerado. Ali serão abordados o modelo de sinal considerado para implementação de desse sistema, bem como o ferramental matemático utilizado para a obtenção das informações de interesse.

2.1 Estado da arte

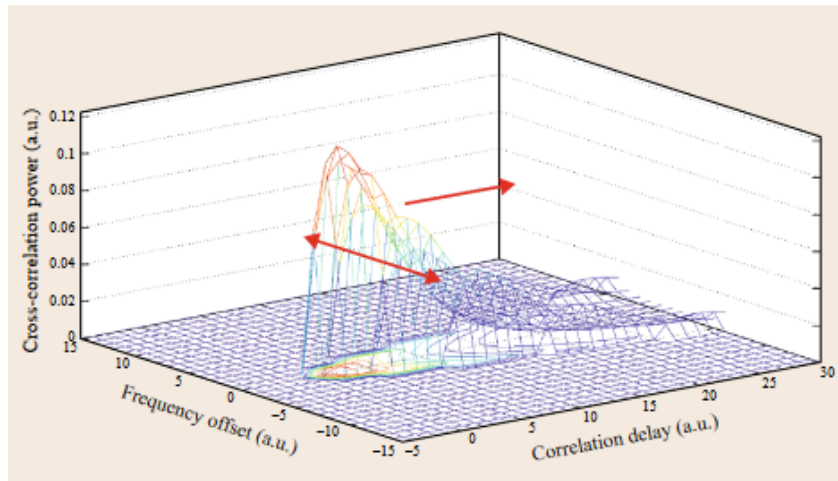
(EGEA-ROCA et al., 2022) associam o desenvolvimento e aprimoramento da tecnologia de sistemas GNSS ao desenvolvimento de semicondutores nessa nova era. Segundo esse autor, tal desenvolvimento possibilitou a miniaturização de componentes, e aumentou o poder computacional de vários dispositivos eletrônicos. Exemplo claro disso é a possibilidade que um usuário de aplicativos de mensagem tem de compartilhar a sua localização atual, ou mesmo de compartilhar sua localização em tempo real com algum outro usuário.

Além de aplicações mais cotidianas e talvez recreacionais, o avanço da tecnologia de GNSS possibilita o sensoriamento remoto de superfícies do planeta, como explica (ZAVROTNY et al., 2014). Utilizando do espalhamento do sinal transmitido de um satélite ao receptor e fazendo o processamento desses sinais que chegam com algumas diferenças de fase e frequência ao receptor, é possível obter informações tais como altitude e características do solo, como relevo, dureza, como mostra a **figura 2**, ou propriedades dielétricas. Nessa figura é possível observar que a característica que se busca extrair vem de uma correlação que é feita entre os sinais enviado e refletido. No eixo vertical a potência dessa correlação é mensurada, de modo que altas correlações, região vermelha, indicam um solo mais macio; enquanto a baixa potência de correlação na região azul indicam um solo mais duro.

Ainda no que tange às aplicações, é possível citar os carros autônomos, que têm ganhado grande evidência na atualidade. Sobre assunto, (NEIL; COSART; ZAMPETTI,

2020) ressaltam como atualmente a maioria dos carros possui sistemas de posicionamento já imbutidos em seus sistemas de interação com o usuário. Porém para que o nível de acurácia necessário à navegação de um carro completamente autônomo seja atingido, propõem um GNSS aumenado, que faz uso de outros recursos presentes nas cidades como radares e câmaras, o que proporcionaria esse aumento de precisão sem aumentar grandemente os custos com a tecnologia.

Figura 2 – Gráfico para avaliar a dureza do solo após processo de reflexão do sinal.



Fonte (TEUNISSEN; MOTENBRUCK, 2017)

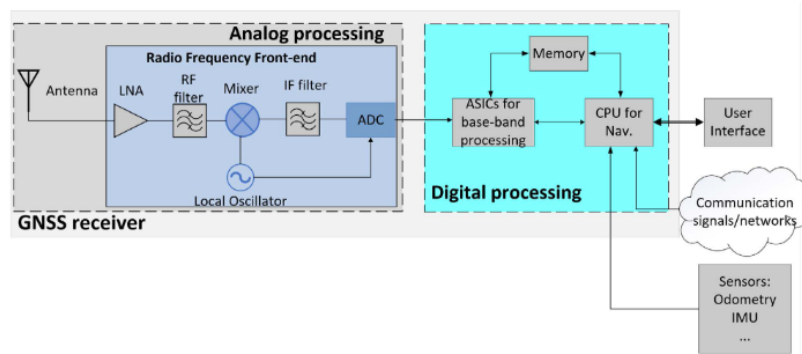
Como visto anteriormente e ressaltado por (EGSA, 2020) a migração do GNSS do meio exclusivo militar para o mercado em massa trouxe outras necessidades e desafios que motivam o avanço dessa tecnologia. Como começou a ser utilizada em ambientes diversos, cria-se a necessidade de sistemas que sejam adaptáveis tanto a ambientes internos quanto externos, urbanos e rurais. Além disso, com o crescente número de usuários, cria-se também a necessidade de se precaver contra roubo de acessos e interferência de sinal. E como esses novos acessos não são contínuos, ao atingirem um dado objetivo os sistemas são desativados e só serão ativados em uma outra ocasião, é necessário também que o tempo para que o receptor fixe a posição dos satélites, *time to fix (TTF)*, seja o menor possível.

Assim, para que esses objetivos sejam alcançados, é necessária a evolução conjunta das diversas partes que compõem os receptores desses sinais. Na **figura 3** é possível ver os componentes da arquitetura desses receptores, desde a antena e recepção em rádio frequências ao processamento dos sinais. Para que haja o aumento de precisão dos sinais e crie-se a robustez necessária, não basta que um desses componentes seja aprimorado sem que o restante o acompanhe. Assim, a parte final dessa seção se dedica a mostrar os avanços e desafios encontrados em cada parte dos componentes dessa tecnologia.

Seguindo a estrutura de recepção apresentada na **figura 3**, nota-se que todo o processo começa na antena de recepção. Diversos são os desafios que estão presentes nesse estágio da recepção do sinal. (WANG, 2012) destaca dois principais desafios no projeto

dessas antenas: largura de banda e restrição de tamanho imposta pela plataforma.

Figura 3 – Arquitetura clássica, a nível de componentes, de um receptor GNSS



Fonte: (EGEA-ROCA et al., 2022)

(TEUNISSEN; MOTENBRUCK, 2017) explicam que o sistema americano de GNSS, o GPS, está centrado em 3 frequências: L1, L2 e L5, a saber, 1.575GHz, 1.227GHz e 1.176GHz, respectivamente. Entretanto, apesar de estar centrado nessas frequências, os receptores precisam ter uma largura de banda de $\pm 10.23\text{MHz}$. Essa largura interfere na capacidade de transmitir e receber informações do satélite com que se comunica. Uma banda mais estreita comprometeria o sistema a taxas inferiores na sua comunicação, tornando-a menos eficiente, por isso ter uma largura de banda adequada é crucial.

Entretanto, (WANG, 2012) explica que atingir a largura de banda necessária e respeitar os limites impostos pela plataforma são requisitos conflitantes, uma vez que estão limitados fisicamente. Toda a geometria e tamanho da antena interferem na sua largura de banda, e quando se é necessário fazer a miniaturização da antena, acaba-se por causar ressonâncias em frequências mais baixas, diminuindo a largura de banda da antena, como explica (EGEA-ROCA et al., 2022).

Assim, é necessário que haja um compromisso entre as características desejadas para a antena do sistema. E atualmente as antenas de microfitas têm feito um bom balanço dessas características, uma vez que são discretas e possuem um considerável ganho de performance, entretanto para que possuam uma largura de banda maior, é necessário que se faça uma sobreposição de camadas, como explica (TEUNISSEN; MOTENBRUCK, 2017), o que pode não atender às restrições da plataforma utilizada.

Em seguida, ainda de seguindo o esquema da **figura 3**, após a antena existe a unidade de processamento analógico. É possível observar que essa parte do receptor é composta por um LNA, *Low Noise Amplifier*, Amplificador de baixo ruído, que amplifica o sinal do satélite, seguido de dois filtros, que ajudam a remover os ruídos de frequências indesejadas. Nessa toada, cabe ressaltar que os componentes em si podem introduzir ruídos no sistema de diversas formas, como ruído térmico, o que dificulta a percepção e tratamento do sinal que é recebido. A função do LNA, portanto é de ampliar esse sinal que

chega, mas procurando introduzir a menor quantidade de ruído possível, porém há de se saber que existirá uma certa quantidade de ruído injetada. E justamente para controlá-lo existem os filtros passa-faixa que seguem o processo de amplificação na cadeia de recepção. Sabendo-se a faixa de frequências do sinal de interesse, esses filtros atenuarão frequências vizinhas, de modo que o sinal anteriormente amplificado fique ainda mais limpo. Por fim, estão o oscilador local e o conversor analógico para digital.

Ademais, cabe ressaltar que os osciladores são componentes em Hardware, ou seja, enfrentam defeitos e imperfeições inerentes a componentes que são fabricados e montados. O oscilador funciona com um cristal interno e a partir das oscilações desse cristal, são produzidas as oscilações utilizadas no processamento em software. Essas oscilações, como explicita (EGEA-ROCA et al., 2022), estão diretamente relacionadas com a temperatura e quanto mais estável a temperatura, mais estáveis as oscilações de clock produzidas pelo oscilador. Fica bem claro que esse é o principal desafio no que tange aos osciladores em hardware, uma vez que estabelecer controles mais sutis de temperatura tonam mais caro o processo de produção de receptores para o mercado em massa.

No último estágio do processamento analógico está o conversor analógico-digital. A fim de fazer essa conversão, é necessário que seja feita uma amostragem do sinal analógico da entrada. Essa amostragem em si requer certo poder computacional, mas dependendo do tamanho das amostras necessárias para se conseguir amostrar o sinal com uma grande quantidade de ruído, mais poder computacional será requerido para processar o tamanho da amostra. Nesse caso há de se fazer um compromisso entre o consumo de energia e memória e a necessidade de precisão na aplicação em que o sinal processado será utilizado.

Finalmente, ao final da cadeia de recepção apresentada na **figura 3**, observa-se a cadeia de processamento digital. Nessa cadeia existem dois componentes principais: o módulo de aquisição e o de *tracking*. O objetivo do módulo de aquisição é fazer uma primeira estimativa dos parâmetros de atraso e doppler do sinal. Essa é uma estimação grosseira desses parâmetros. Entretanto, por lidar com velocidades na ordem de 10^8 , pois são ondas eletromagnéticas, erros podem representar metros de erros, assim, é necessário que uma estimativa mais refinada seja feita. É para essa função que existe o sistema de *tracking*.

Cabe ressaltar que o estudo do bloco de *tracking* é o principal assunto deste documento. (EGEA-ROCA et al., 2022) ressalta que a perspectiva de evolução para esses módulos está na miniaturização e também no uso de memória por parte dos chips de processamento. Uma vez que os usos de mercado do GNSS estão necessitando de mais precisão, é necessário mais disponibilidade de memória para acumular correlações mais precisas.

Por fim, é possível notar que a tecnologia de *Global Navigation Satellite Systems*, por mais consagrada que seja, ainda possui espaço para otimizações e melhorias, que

surtem da demanda que o mercado em massa, isto é o uso comercial e cotidiano, tem requerido desses sistemas. Desde a cadeia analógica à digital, é possível encontrar espaço e oportunidades para aperfeiçoamento dessas tecnologias que vêm ganhando mais espaço e aplicações no cotidiano.

Agora, esse trabalho se dedica a demonstrar o funcionamento das partes necessárias ao entendimento do sistema de *tracking* e sua operação.

2.2 Operação do *tracking*

Como mostrado na **figura 1**, ao final de todo o processamento que ocorre dentro de um receptor de sinais GNSS, o que se deseja é obter posição, velocidade e tempo (PVT). E para tal, não diferentemente de toda análise física para determinação de posição, velocidade e tempo, inicialmente adota-se um referencial, que, no caso de navegação por satélite, será o próprio satélite.

Porém, não basta um satélite apenas, pois isso não expressaria com exatidão alguma a posição do receptor em relação ao satélite. Se o satélite estivesse no centro de uma circunferência e o receptor na borda dessa, de modo que se pudesse argumentar que a distância entre o satélite e o receptor seja de r , o raio dessa circunferência, o receptor poderia estar em qualquer ponto dessa circunferência, em qualquer posição dos 360° disponíveis e a distância continuaria sendo a mesma sem que se pudesse de fato determinar a posição do receptor.

Para resolver esse problema, usa-se uma técnica conhecida como trilateração, que está representada a seguir na **figura 4**. Agora, em vez de existirem várias posições possíveis para que o receptor ocupe em relação ao satélite, existe apenas uma possível, que está na intersecção da transmissão feita pelos três satélites.

Apesar de a **figura 4** mostrar um caso bidimensional, o problema real ocorre em um caso tridimensional, o que torna o campo de alcance dos sinais dos satélites não mais em circunferências, mas esferas, sendo que o ponto estimado do receptor estará na intersecção das 3 esferas de sinal enviada por eles. E sua posição em relação a eles pode ser determinada por:

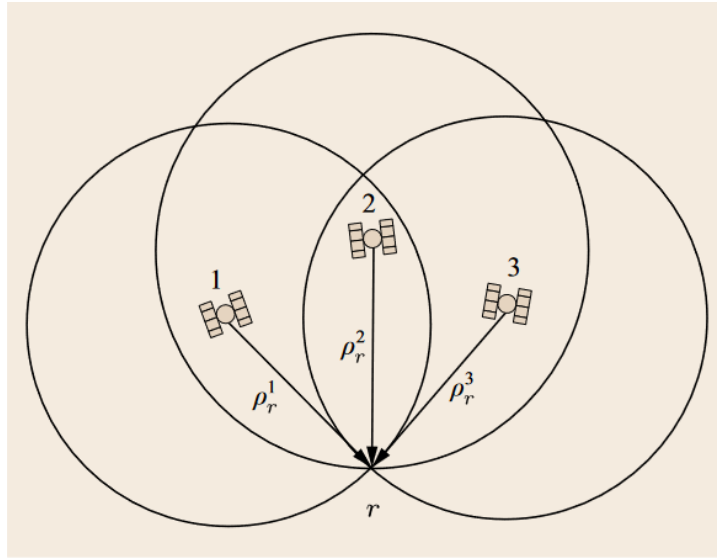
$$\rho_{r1} = \sqrt{(x_r - x_1)^2 + (y_r - y_1)^2 + (z_r - z_1)^2} \quad (2.1)$$

$$\rho_{r2} = \sqrt{(x_r - x_2)^2 + (y_r - y_2)^2 + (z_r - z_2)^2} \quad (2.2)$$

$$\rho_{r3} = \sqrt{(x_r - x_3)^2 + (y_r - y_3)^2 + (z_r - z_3)^2} \quad (2.3)$$

,onde ρ_{rn} é a distância do receptor para o satélite n .

Figura 4 – Representação bidimensional da trialteração ideal



Fonte: (TEUNISSEN; MOTENBRUCK, 2017)

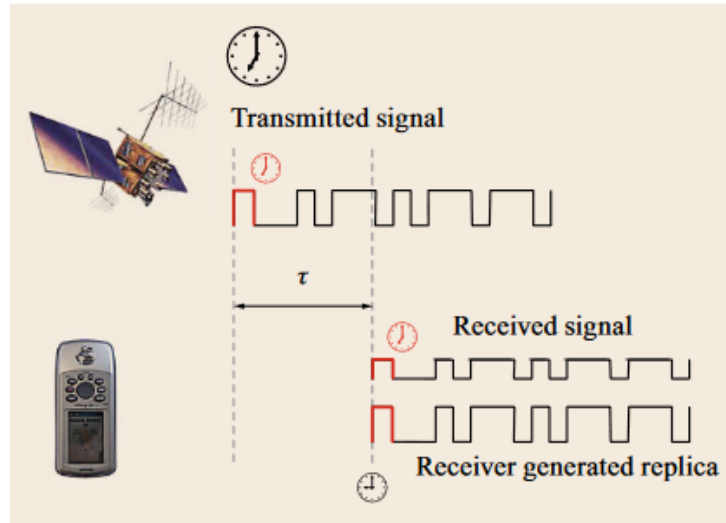
Por mais que esse modelo já esteja levando em conta fatores como posicionamento em três dimensões, ainda há algumas simplificações que estão implícitas nele e que podem levar a grandes erros. Uma dessas é não considerar o tempo de propagação do sinal desde o satélite emissor ao receptor.

Por mais que a velocidade da luz seja muito alta, a propagação de uma onda eletromagnética através do espaço não acontece instantaneamente, ou seja, leva-se um tempo para que o sinal enviado do satélite chegue ao receptor. E é justamente por meio desse atraso, τ , que é medida a distância que o satélite está do receptor.

Para fazer essa estimativa de tempo, o receptor faz uso de um oscilador interno, como mostra a **figura 3**, que busca reproduzir um tipo específico do sinal que é enviado pelo satélite, como é mostrado na **figura 5**. Como explica (TEUNISSEN; MOTENBRUCK, 2017), esse sinal que é gerado localmente é continuamente comparado ao sinal que está chegando na entrada. Para que esse sinal seja semelhante ao que está chegando, é necessário que haja sincronismo entre o clock que está produzindo a replica e o que gerou o sinal com que é comparado. Com essa defasagem que está sendo colocada no sinal gerado, é possível obter a distância que o receptor está do satélite.

Todavia, quando se está tratando de velocidades tão altas como as da luz, pequenos erros de tempo transformam-se em grandes erros de distância e a capacidade de sincronizar o clock do oscilador local com o do transmissor torna-se um fator determinante para a posição do receptor do sinal, inserindo uma incerteza de posição na trialteração representada na **figura 4**. Condensando o problema para 2 dimensões, a incerteza inserida seria como apresentado na **figura 6**. Nela é possível ver que a posição precisa da trialteração será tão mais precisa quanto menor for o raio da circunferência tangente àquelas que

Figura 5 – Recepção e geração de réplica do sinal de GNSS

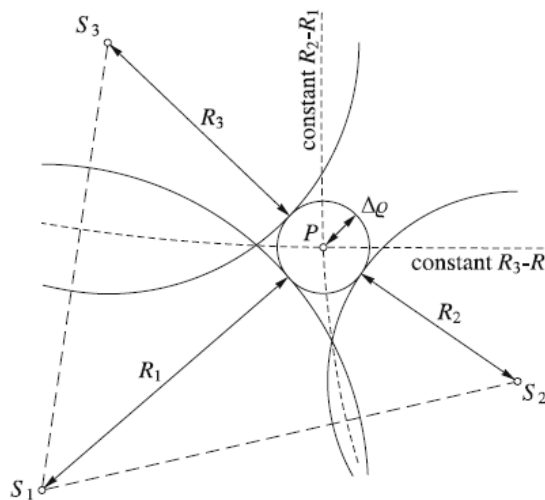


Fonte: (TEUNISSEN; MOTENBRUCK, 2017)

representam o sinal emitido pelos satélites. Essa circunferência mais interna é exatamente o erro de posicionamento que será causado pelo dessincronismo entre os sinais.

Como várias informações a respeito do PVT são retiradas não apenas do conteúdo da mensagem, mas também de seu formato, os sinais de GNSS possuem algumas especificidades que permitem a obtenção dessas informações. Agora, esses serão vistos em mais detalhes.

Figura 6 – Trilateração com a incerteza associada à dessincronia do clock do receptor em relação ao do transmissor, Δ_Q



Fonte: (HOFFMANN-WELLENHOF, 2008)

2.2.1 O sinal GNSS

Referências

- EGEA-ROCA, D. et al. Gnss user technology: State-of-the-art and future trends. *IEEE Access*, v. 10, p. 39939–39968, 2022. Citado 3 vezes nas páginas 7, 9 e 10.
- EUROPEAN GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEMS AGENCY. *GNSS User Technology Report: Issue 3*. Czech Republic, 2020. Citado na página 8.
- HOFFMANN-WELLENHOF, B. *GNSS - Global Navigation Satellite Systems GPS, GLONASS, Galileo and more*. 1st. ed. Austria: SpringerWienNewYork, 2008. ISBN 978-3-211-73012-6. Citado na página 13.
- NEIL, J.; COSART, L.; ZAMPETTI, G. Precise timing for vehicle navigation in the smart city: An overview. *IEEE Communications Magazine*, v. 58, n. 4, p. 54–59, 2020. Citado na página 8.
- SADIKU, M.; AKUJUOBI, C. Software-defined radio: a brief overview. *IEEE Potentials*, v. 23, n. 4, p. 14–15, 2004. Citado na página 3.
- TEUNISSEN, P. J.; MOTENBRUCK, O. *Handbook of Global Navigation Satellite Systems*. 1st. ed. GER: Springer, 2017. ISBN 978-3-319-42926-7. Citado 4 vezes nas páginas 8, 9, 12 e 13.
- WANG, J. J. H. Antennas for global navigation satellite system (gnss). *Proceedings of the IEEE*, v. 100, n. 7, p. 2349–2355, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 9.
- ZAVOROTNY, V. U. et al. Tutorial on remote sensing using gnss bistatic radar of opportunity. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, v. 2, n. 4, p. 8–45, 2014. Citado na página 7.