

Tesina de grado - Ingeniería en Telecomunicaciones

Juan Fermín Llorente

Directores

jurados

foto unlp

foto senyt

Diciembre, 2022

Índice de contenidos

Índice de contenidos	1
Índice de figuras	2
Introducción	3
Motivación	3
Objetivos	3
1. Sistemas globales de navegación por satélite	4
1.1. Introducción	4
1.2. Características de la señal	5
1.3. Formación de los observables	7
1.3.1. Medición de pseudorango	8
1.3.2. Medición de fase de portadora	9
1.4. Errores	10
1.5. Determinación de la posición	13
2. GNSS diferencial	16
2.1. Introducción	16
2.2. Múltiples mediciones combinadas	17
2.2.1. Simples diferencias	17
2.2.2. Dobles diferencias	19
2.2.3. Triples diferencias	20
2.2.4. Línea de base nula	21
2.3. Resolución de ambigüedades en mediciones de fase de portadora	22
2.4. Real Time Kinematics	23
2.5. Estándar RTCM v3.3	24
2.5.1. Formato del mensaje	25
2.5.2. Mensaje de la estación de referencia estacionaria	26
2.5.3. Mensajes de múltiples señales	27
2.5.4. Campos de los mensajes MSM	30

Índice de figuras

1.1. Ejemplo de las distintas partes que conforman a la señal GPS.	6
2.1. Esquema del armado de combinación de simples diferencias.	18
2.2. Configuración de receptores y satélites necesaria para dobles diferencias (DD).	20
2.3. Configuración con linea de base nula.	21
2.4. Rango al satélite durante todo el tiempo que permanece en vista. . . .	29

Introducción

Intro o contexto

Motivación

Objetivos

Se terminan los objetivos con la estructura del trabajo.

Capítulo 1

Sistemas globales de navegación por satélite

Este capítulo introduce los primeros conceptos para el posicionamiento basado en sistemas de navegación por satélite. Incluye una breve descripción del sistema de posicionamiento global (GPS por sus siglas en inglés) junto con sus señales y las mediciones que pueden obtenerse mediante las mismas. Se hace hincapié en las características de estas señales, analizando las fuentes de error que hay presentes en las mediciones que pueden obtenerse de las mismas. Si bien el foco de este trabajo está puesto en el sistema GPS, ya que los resultados obtenidos son para el mismo, se desarrollan los conceptos de este capítulo de forma general para todos los sistemas.

1.1. Introducción

Los sistemas GNSS (*Global Navigation Satellite System* en inglés) se basan en el concepto de mediciones de rango mediante el retardo de propagación de las señales transmitidas por satélites de posicionamiento que orbitan la tierra. Ante la necesidad de poder contar con mecanismos para obtener posición y velocidad de usuarios en la tierra, a la cual se agrega la necesidad de sincronización entre distintos sistemas de referencia temporal, surge la idea e implementación de los sistemas GNSS. Los mismos no han dejado de ser utilizados desde su puesta en funcionamiento debido a que permiten cobertura global para distintas aplicaciones de posicionamiento. Se mencionó que pueden ser utilizados para sincronización de relojes debido a que las señales que transmiten los satélites también tienen información temporal de alta precisión. Además del uso civil, están las aplicaciones científicas o militares, pero existen áreas donde estos sistemas presentan un uso extendido y creciente, tales como la geodesia, seguimiento de fauna, navegación aérea, satelital, terrestre y marítima.

El concepto subyacente para poder obtener posición es el de triangulación. El tiempo de arribo (TOA por sus siglas en inglés) determina el instante en el que se recibió la señal, conociendo el instante en el que la misma fue transmitida se puede determinar el tiempo de viaje de la misma. Haciendo uso de la velocidad de propagación de la señal es posible obtener el rango en el que se encuentra el equipo transmisor. Introduciendo múltiples mediciones de rango con satélites transmitiendo en distintas ubicaciones se puede acotar la ubicación del receptor. La solución puntual queda determinada por el punto de intersección de las esferas formadas por el rango que se midió a cada uno de

los satélites involucrados, siempre y cuando se tomen suficientes mediciones para poder resolver la posición de manera unívoca.

Habiendo introducido el concepto de medición de rango mediante TOA, es necesario analizar la sincronización entre las distintas partes que conforman el sistema. Si se busca resolver la posición mediante este concepto, las señales recibidas de los distintos satélites deben haber sido transmitidas en el mismo instante de tiempo. El instante de tiempo de toma de las observaciones tiene el nombre de época en este contexto. Es evidente que para conseguir esto los relojes de referencia de los satélites y del usuario (llamado receptor anteriormente) deben tener muy alta precisión y sincronización entre ellos. Para ello se busca alinear los instantes de toma de medición de los receptores a las épocas del tiempo del sistema. La precisión no es un inconveniente ya que los satélites GPS utilizan relojes atómicos que logran una estabilidad destacable. En cambio, la sincronización del usuario al tiempo del sistema GPS (al cual deberían estar sincronizados todos los satélites de la constelación), es un tanto más compleja y por ello se analizarán los errores que introducen las fallas en la sincronización.

Existen distintos sistemas GNSS, tales como *GPS*, *Galileo*, *Glonass* o *BeiDou*, cada uno con su respectiva constelación de satélites MEO (*Medium Earth Orbit* u Órbita Circular Intermedia). Todos los satélites de las distintas constelaciones comparten el canal de transmisión, esto es posible debido al uso de técnicas de acceso múltiple. En particular, el sistema GPS cuenta con 32 satélites operativos actualmente y como la frecuencia de operación es compartida por todos los satélites, el mismo utiliza acceso múltiple por división de código (CDMA por sus siglas en inglés). En cambio, el sistema *Glonass* cuenta con 24 satélites operativos y cada uno transmite dentro de la misma banda de frecuencias multiplexando los canales por frecuencia dentro de esta banda. Esta técnica es conocida como acceso múltiple por división de frecuencia (FDMA por sus siglas en inglés).

1.2. Características de la señal

Las señales transmitidas se encuentran dentro del espectro de las radiofrecuencias. Existen distintos tipos de señales, según se fueron modernizando los sistemas, y en particular los satélites, se han ido sumando nuevas señales. Las características principales que componen a una señal de GPS son la frecuencia de portadora dentro de la banda L , el código que hace posible el acceso múltiple y por último el mensaje de navegación.

En cuanto a la frecuencia de portadora de la señal, para aplicaciones civiles se puede diferenciar la frecuencia primaria L_1 y frecuencia secundaria L_2 . Ambas son múltiplos de una frecuencia fundamental $f_0 = 10,23$ MHz. La señal en L_1 tiene una frecuencia de portadora igual a $154 \cdot f_0 = 1,5754$ GHz y la señal en L_2 igual a $120 \cdot f_0 = 1,2276$ GHz. Estas dos señales son las consideradas *legacy* ya que fueron heredadas de los primeros bloques de satélites GPS que se hicieron operativos. También existe la señal en L_5 , una señal mas moderna, pero que no es utilizada a lo largo de este trabajo por lo que solo se la menciona.

Las señales son expandidas en el espectro mediante una secuencia de ruido pseudoaleatoria (*PRN* por sus siglas en inglés), esta secuencia es el código que ya fue mencionado. Las técnicas de espectro expandido de secuencia directa (DSSS por sus siglas en inglés) utilizadas, distribuyen la energía de la señal de cada satélite en todo el ancho de banda disponible. De esta manera es posible mitigar efectos adversos na-

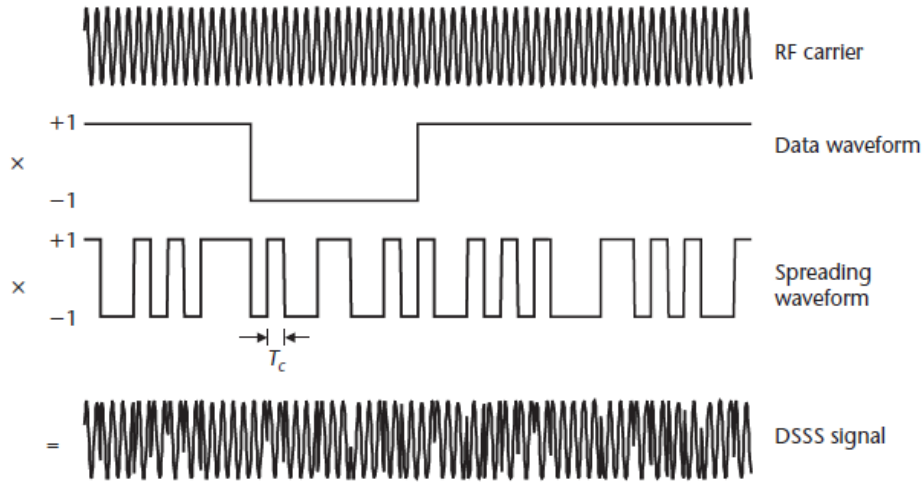


Figura 1.1: Ejemplo de las distintas partes que conforman a la señal GPS.

turales del canal como lo son el ruido o interferencias, además de presentar la ventaja de permitir el acceso múltiple entre usuarios estas técnicas presentan robustez frente a interferencias intencionadas. Esta última característica generaba gran interés al momento de creación del sistema GPS con fines militares. Se logra expandir la señal de manera tal que la misma queda oculta por el piso de ruido presente en el canal. El receptor, que conoce el código con el cual se hizo la expansión, logra recuperar la señal pudiendo incluso considerar a las señales del resto de los satélites como interferencias.

Los mensajes de navegación en GPS se transmiten con una tasa de 50 bps, como la modulación es BPSK esto resulta en un ancho de banda de 50 Hz. Los símbolos transmitidos son de 20 ms de duración con conformación espectral idealmente dada por cajones. La información transportada por el mensaje de navegación es la que hace posible computar la posición de cada satélite y tiempo de transmisión de las señales. En los mismos se transmite, entre otras cosas, el mensaje de telemetría, al cual solo tienen acceso usuarios autorizados, términos de corrección de reloj para desafectar errores en la medición y como componente principal, se transmiten las efemérides. Estos últimos dos son indispensables para que el usuario pueda calcular su posición. Las efemérides contienen la información del tiempo del satélite (referenciado al tiempo GPS), parámetros keplerianos de las órbitas osculantes de los satélites.

En términos generales, la polaridad de cada símbolo rectangular estará dada por el bit de información de navegación a transmitir. Luego se expande esta señal mediante el producto de la amplitud de cada símbolo con el código, la modulación por desplazamiento de fase de la señal resultante estará dominada por las transiciones del código (Fig. 1.1). Cabe destacar que cada transición del código es denominado *chip*. Es evidente que la tasa resultante de la señal BPSK multiplicada por el código es mucho mayor que la de la señal original, ya que en cada transición de símbolo tiene múltiples transiciones de *chip*. La señal de espectro expandido tiene una tasa igual a la tasa de *chip* R_c tal que $R_c \gg R_b$, resultando en una expansión en el espectro.

Este mecanismo implica que el receptor conozca con exactitud el código utilizado en la expansión para poder multiplicar a la señal por el mismo, considerando sincronización perfecta, y así recuperar la señal original. Este proceso se puede interpretar como la compresión de la señal expandida al momento de la transmisión, y en recepción es

donde se recupera solo la señal de interés.

Como ya fue mencionado, el sistema utiliza CDMA para multiplexar las señales de los distintos satélites. Cada satélite tiene una secuencia PRN que debe cumplir con las características de presentar autocorrelación muy similar a la de un proceso de ruido blanco, para su correcta recuperación en el receptor cuando hay sincronización. Y además debe tener muy baja intercorrelación con los códigos del resto de los satélites. Esta última condición es necesario extenderla para que cada PRN tenga baja intercorrelación con todos los posibles desplazamientos de los restantes códigos del sistema. Esto se debe a las variaciones de TOA de las diferentes señales y por el mecanismo de medición de tiempo de viaje de la señal que se detallará posteriormente. Las PRN que presentan estas características son las secuencias *Gold* [1] y son las utilizadas por el sistema GPS. Si los distintos códigos fueron diseñados (o elegidos) correctamente, las interferencias del resto de las señales no deseadas pueden ser consideradas como ruido aditivo a la señal de interés.

Ya se introdujo el mecanismo de multiplexado de las señales de cada satélite y se detallaron algunos aspectos de las señales GPS. Las señales civiles mencionadas pueden estar expandidas por distintos códigos, que en conjunto con la frecuencia de portadora son los dos parámetros que le dan nombre a los observables obtenidos. Estos nombres están estandarizados según el estándar RINEX (*The Receiver Independent Exchange Format*)[7]. Dentro de estos códigos se pueden mencionar el código C/A (por *Coarse Acquisition*) y el código P.

- Código C/A: Es referido como el código grueso, y es de la familia de códigos de largo 1023. Tiene una tasa de 1.023 Mchips/s por lo tanto tiene un periodo de *chip* igual a $1\mu\text{s}$.
- Código P: Este código se repite una sola vez por semana, al comienzo de la semana GPS (dentro del sistema de tiempo GPS), por eso se lo menciona como código largo o de precisión. Tiene un largo de $6,187104 \cdot 10^{12}$ chips y se transmite a una tasa diez veces mayor que la del código C/A.

1.3. Formación de los observables

Para poder obtener una solución de posición es necesario calcular los observables a partir de las mediciones que puede realizar el receptor. En otras palabras, el receptor no tiene manera de medir distancia recorrida por una señal, pero si puede medir el retardo que se produjo en la señal entre la transmisión y la recepción para formar un observable de pseudorango. Las mediciones naturales del receptor son la fase del código réplica generado en el receptor, fase de la portadora réplica (con el receptor enganchado en fase a la portadora transmitida por el satélite) y frecuencia de la portadora réplica (con el receptor ahora enganchado en frecuencia). A partir de estas es posible obtener las mediciones de los observables de pseudorango, fase de portadora y desviación de frecuencia de portadora o *Doppler*. Este último no es utilizado a lo largo de este trabajo por lo que no se hará hincapié en el mismo.

1.3.1. Medición de pseudorango

La formación del pseudorango se basa en la medición del tiempo de viaje de la señal y es aquí donde se aprovechan las características de los códigos mencionados en la Sección 1.2. El receptor debe conocer el código (ya sea C/A o P) asociado al satélite y señal que quiere recibir. Este se utiliza para generar una replica del mismo en el lazo de enganche de retardo (DLL por sus siglas en inglés) del receptor de manera que el mismo pueda comparar el desfase que existe entre el código de la señal recibida con el generado internamente, obteniendo el tiempo de viaje de la señal. Por esto es que la medición natural que fue mencionada es la de la fase del código replica. Ambos códigos se generan internamente en el receptor al inicio de la semana GPS y al medir el desfase entre la replica y el recibido se posiciona el TOA dentro de la semana GPS. En el caso del código C/A hay una ambigüedad de 1 ms debido a su periodo, pero se obtiene el TOA bajo estas condiciones y haciendo uso del mensaje de navegación se logra una medida absoluta. En el caso del código P se obtiene una ubicación absoluta dentro de la semana GPS, no existe tal ambigüedad. Para medir el desfase, el receptor desplaza en tiempo la replica hasta lograr correlación entre ambas señales, por esto es importante que la intercorrelación entre los códigos sea baja para todos los desplazamientos de los mismos. De esta manera se evitan falsas detecciones, solo consiguiendo un pico de correlación cuando hay sincronización con el código del satélite que se espera recibir.

Sumado al rango geométrico que se obtiene del tiempo de viaje, existen términos de error adicionales debido a efectos atmosféricos, por sincronización entre relojes del receptor y satélites, y distintos retardos que se pueden presentar en la medición. La ecuación de observación con medición de pseudorango es

$$p_{r,j}^s(t) = \rho_r^s(t) + \xi_{r,j}^s + c(d_{r,j} - d_j^s) + c(dt_r(t) - dt^s(t) + \delta t^{rel}(t)) + I_{r,j}^s(t) + T_r^s(t) + e_{r,j}^s(t) . \quad (1.1)$$

Es necesario introducir los términos de la misma. Además, cabe aclarar que la medición no es considerada rango por el hecho de que contiene los efectos de falta de sincronización entre los relojes del usuario y el satélite, de aquí surge el nombre de pseudorango.

- $p_{r,j}^s(t) [m]$: Pseudorango del usuario con el satélite obtenido con la ecuación de observación, siendo j el identificador para las distintas señales del mismo satélite.
- $\rho_r^s(t) [m]$: Rango geométrico entre el usuario y el satélite.
- $\xi_{r,j}^s [m]$: Término de corrección debido a sesgos en los centros de fase de las antenas transmisora y receptora.
- $d_{r,j}, d_j^s [s]$: Retardos instrumentales o de hardware en el receptor y en el satélite, respectivamente.
- $dt_r(t), dt^s(t) [s]$: Sesgos en el reloj del receptor y del satélite, respectivamente.
- $\delta t^{rel}(t) [s]$: Sesgo debido al efecto relativista. Se considera en el mismo una contribución por la corrección relativista al reloj y otra por el retardo en la señal debido al efecto de la curvatura espacio-tiempo.
- $I_{r,j}^s(t), T_r^s(t) [m]$: Retardo ionosférico y troposférico, respectivamente.

- $e_{r,j}^s(t) [m]$: Errores adicionales, tales como multicamino y por ruido térmico en el receptor.

Los términos que tienen una dependencia con la frecuencia mantienen el índice j que es el indicador de señal, y por consecuente de frecuencia.

1.3.2. Medición de fase de portadora

La misma se realiza en el lazo de enganche de fase (*PLL* por sus siglas en inglés), midiendo el desfasaje que existe entre la portadora recibida y la portadora replica generada internamente en el receptor. Se mide la fase de la componente de portadora pura, es decir, sin el código PRN ni el mensaje de navegación. La medición natural es la cantidad de ciclos de portadora que transcurrieron entre la transmisión y la recepción de la señal, que cabe aclarar que no se obtiene contando ciclos. Este valor es estimado por el receptor como el resultado de la integración del *doppler* de portadora, por esto también suele ser referido como rango *doppler* acumulado. Una vez que se cuenta con una medida de cantidad de ciclos de portadora en el tiempo de viaje de la señal, el rango se obtiene multiplicando por la longitud de onda. La cual estará en el rango de 19 cm a 25 cm, el valor más chico corresponde a la señal L_1 y la mayor a L_2 . Esta longitud de onda pequeña trae ventajas a la medición en términos de precisión, se logra una precisión mucho más alta que con la medición de pseudorango. Sin embargo, en este enfoque no es posible salvar la ambigüedad haciendo uso del mensaje de navegación ya que se pierde la señal modulada en la portadora. Es por esta razón que existe un numero entero de longitudes de onda presente en esta medición que se mantiene sin resolver. La ecuación de observación con medición de fase de portadora es

$$\varphi_{r,j}^s(t) = \rho_r^s(t) + \zeta_{r,j}^s(t) + c(\delta_{r,j}^s - \delta_j^s) + c(dt_r(t) - dt^s(t) + \delta t^{rel}(t)) - I_{r,j}^s(t) + T_r^s(t) + \lambda_j(\omega_r^s(t) + N_{r,j}^s) + \epsilon_{r,j}^s(t) . \quad (1.2)$$

- $\varphi_{r,j}^s(t) [m]$: Medición de fase de portadora entre el usuario y el satélite obtenido con la ecuación de observación, siendo j el identificador de las señales del mismo satélite.
- $\rho_r^s(t)$, $dt_r(t)$, $dt^s(t)$, $\delta t^{rel}(t)$, $I_{r,j}^s(t)$, $T_r^s(t)$: Equivalentes a los términos en la Ecuación (1.1).
- $\zeta_{r,j}^s [m]$: Término de corrección debido a sesgos en los centros de fase de las antenas transmisora y receptora.
- $\delta_{r,j}$, $\delta_j^s [s]$: Retardos instrumentales o de hardware en el receptor y en el satélite, respectivamente.
- $\lambda_j [m]$: Longitud de onda a la frecuencia de la señal j -ésima.
- $\omega_r^s(t) [ciclos]$: Corrección de *wind-up* de fase. Corresponde a cambios en la fase medida en caso de rotación de las antenas.
- $N_{r,j}^s [ciclos]$: El número entero de ciclos de la portadora presentes en la medición, es la ambigüedad que queda sin resolver.

- $\epsilon_{r,j}^s(t)$: Errores adicionales, tales como multicamino y por ruido térmico en el receptor.

Cabe destacar que los términos que representan los mismos fenómenos que en la Ecuación (1.1) pero tienen distintos símbolos, es debido a que tienen distinta naturaleza.

Los términos desconocidos son obtenidos al resolver el sistema de ecuaciones linealizadas ya mencionado, sin embargo, se pueden observar múltiples épocas y de esta manera realizar una estimación de estos parámetros. No solo se estiman los términos correspondientes a los errores de rango, si no también se incluye la ambigüedad de fase de portadora. En principio, todos los términos desconocidos de la Ecuación (1.2) son estimados.

Una forma de tener control en el valor de las ambigüedades que observamos en la Ecuación (1.2) es alineando el inicio de la integración del *doppler* con el correspondiente pseudorango. De esta manera aseguramos no tener un valor de ambigüedades que aparte considerablemente la medición de fase de la medición de pseudorango, aunque de igual manera se mantendrán las ambigüedades en la medición.

1.4. Errores

Es de particular interés para este trabajo analizar la naturaleza de los términos de error que están involucrados en las Ecuaciones (1.1) y (1.2). Será de gran utilidad a la hora de trabajar con observaciones en diferencias.

Error en el reloj del satélite y usuario

El término que hace referencia a este fenómeno del lado del satélite es $dt^s(t)$. Es necesario aclarar que los satélites *GPS* cuentan con relojes atómicos de elevada estabilidad, por lo que los errores son principalmente debido a sesgos entre el sistema de tiempo *GPS* y el tiempo propio del satélite. El tiempo del sistema está referenciado al tiempo UTC (USNO). El segmento de tierra se encarga de enviar varias veces por hora las correcciones necesarias para disminuir este error en los satélites GPS, haciendo que la diferencia entre el tiempo del satélite y la del sistema *GPS* sea menor a $1 \mu s$. Además, cada satélite transmite parámetros para que el usuario pueda corregir la diferencia de tiempo que queda remanente entre el tiempo del satélite y el tiempo del sistema. La actualización de estos parámetros se realiza diariamente. Se transmiten un coeficiente para corregir el sesgo de reloj, la deriva de reloj y la deriva de frecuencia o envejecimiento, a_{f0} , a_{f1} , a_{f2} respectivamente. Y con ellos se obtiene

$$dt^s(t) = a_{f0} + a_{f1}(t - t_{oc}) + a_{f2}(t - t_{oc})^2 . \quad (1.3)$$

Se define una curva usada para corregir el tiempo del satélite, de manera que t_{oc} es el tiempo de referencia para el cual la curva es válida.

En cuanto al error del usuario, denotado $dt_r(t)$, es una medida de desincronización del reloj del usuario con el tiempo del sistema *GPS*.

Retardos instrumentales en satélite y usuario

Corresponden a sesgos en la etapa de procesamiento, ya sea analógico o digital. El término dependiente del satélite (d_j^s), es causado por diferencias de retardo en el

camino analógico y digital de la unidad de generación de la señal y de la antena, que no son iguales para las distintas señales. Este término es asumido igual para todos los receptores que se encuentren siguiendo a la misma señal. La contribución asignada al usuario ($d_{r,j}$), es causado por diferencias de camino de la señal desde la antena a la etapa de correlación. Son asumidos iguales para todas las señales del mismo tipo siempre y cuando sean recibidas por el mismo usuario.

Cabe destacar que la parte principal de esta componente de sesgo no corresponde a la sección analógica del receptor, sino a la cadena de procesamiento digital de la señal (*DSP* por sus siglas en inglés) [3](19.6.2). De manera que son sesgos que se pueden eliminar mediante una correcta calibración del receptor.

Sesgo en el centro de fase de la antena

Al tratar con la posición del satélite o del usuario se termina considerando la ubicación de la antena transmisora y receptora, respectivamente. Para ser más precisos, el centro de fase de ambas antenas, y el mismo puede no mantenerse fijo. Tiene influencia en especial para aplicaciones de alta precisión, ya que considerar que todas las señales llegan a un mismo punto deja de ser valido dependiendo de la dirección con la que inciden las señales a la antena y la frecuencia. Este es otro efecto que puede ser desafectado mediante calibración.

Sesgo debido al efecto relativista

Este término aparece como $\delta t^{rel}(t)$ en la ecuación de observación. El reloj del satélite sufre desviaciones en frecuencia respecto a uno que se encuentra en tierra, debido al movimiento del satélite y los cambios en el potencial gravitatorio. Para compensar este efecto (atribuido a la relatividad especial y general) los relojes no trabajan exactamente a la frecuencia necesaria para generar las señales L_1 y L_2 , sino que generan una frecuencia levemente menor. En lugar de considerar la frecuencia $f_0 = 10,23$ MHz para generar las frecuencias L_1 y L_2 , se configura $f_0 = 10,22999999543$ MHz. De esta manera, cualquier usuario en tierra recibe la señal compuesta con los efectos relativistas, y observa la señal sin desviación de la frecuencia esperada. Sin embargo, esta corrección efectuada en el satélite, no corrige todo tipo de error ya que las órbitas de los satélites *GPS* no son perfectamente circulares. Se agrega entonces una contribución al corrimiento en frecuencia debido a la excentricidad no nula de la órbita y el mismo puede ser calculado como

$$\delta t_{clk}^{rel}(t) = -\frac{2}{c_0^2} \sqrt{a\mu} e \sin(E) . \quad (1.4)$$

Donde a es la longitud del semieje mayor de la órbita, e la excentricidad de la órbita, μ la constante gravitacional geocéntrica y E la anomalía excentrica del satélite. Se puede acotar este término ya que la excentricidad máxima permitida para las órbitas GPS es de 0.02, resultando en 45 ns, lo que equivale a 13.5 m.

Por otro lado, existe una contribución debido al efecto *Shapiro*, un retardo en la señal debido al campo gravitacional de la tierra. El mismo tiene un valor máximo de 60 ps para un usuario en la tierra, equivalente a 2 cm considerando satélites MEO como lo son las constelaciones GNSS. Todas estas contribuciones son las que conforman el término ya mencionado en la ecuación de observación.

Retardo ionosférico

Uno de los dos efectos atmosféricos presentes en la medición de las señales *GPS* es el debido a la ionosfera. El hecho de que la ionosfera sea un medio dispersivo genera diferentes retardos a las distintas componentes en frecuencia de la señal, en particular la señal se atrasa frente a la fase de portadora, este efecto es conocido como divergencia ionosférica. Las variaciones en el índice de refracción que sufre la ionosfera se deben a cambios que existen en el contenido total de electrones (TEC por sus siglas en inglés), estos cambios se comportan con una dinámica lenta por lo que realizando mediciones en una suficiente cantidad de épocas puede proveer una buena estimación de la corrección a realizar. Por otro lado, se pueden realizar mediciones a doble frecuencia para aprovechar la dependencia del retardo con la misma, y así estimar la corrección.

En las expresiones de observación de las Ecuaciones (1.1) y (1.2) el retardo ionosférico tiene distinto signo. Esto se debe al hecho de que es un medio dispersivo, dado que la fase y el código no viajan a la misma velocidad ambos son afectados por un índice de refracción distinto. Se puede aproximar a primer orden el índice de refracción de grupo como

$$n_g \approx 1 + \frac{40,3n_e}{f^2} , \quad (1.5)$$

con n_e la densidad de electrones. En el caso de el índice de refracción aproximado para la fase de portadora se obtiene

$$n_p \approx 1 - \frac{40,3n_e}{f^2} . \quad (1.6)$$

Calculando los retardos de grupo y fase como

$$\Delta\tau_{g,p} = \frac{1}{c} \int (n_{g,p}(l) - 1) dl = \pm \frac{40,3 \cdot TEC}{cf^2} , \quad (1.7)$$

se puede ver como para la medición de fase de portadora el retardo ionosférico resulta con signo opuesto que para el pseudorange.

Debido a esta dependencia con la frecuencia del retardo producido por la ionosfera, que incluso puede ser predecida, es que los sistemas GNSS transmiten señales en distintas frecuencias. De esta manera un receptor recibiendo señales en múltiples frecuencias puede compensar estos efectos en las mediciones.

Retardo troposférico

El retardo debido a la tropósfera está asociado a las irregularidades que existe en el índice de refracción de la misma, es un efecto que afecta a la señal en la última etapa del camino que recorre desde el satélite hasta el usuario, si el mismo se encuentra en tierra. No se observan variaciones a gran escala del índice de refracción, por lo que la troposfera es un medio no dispersivo en la banda de GPS (banda L). Se puede separar en dos componentes, la componente seca es predominante (se lleva un 90 % de la contribución total de este efecto) y tiene alto grado de predictibilidad. El otro 10 % es denominado la componente húmeda y no es tan sencillo de predecir. La separación se hace según la altura de la capa, siendo la componente seca la correspondiente a la parte inferior de la atmósfera (troposfera) y la componente húmeda la capa superior a la troposfera (estratosfera aunque en estas aplicaciones se consideran como un conjunto).

Los dos términos de retardo atmosférico son altamente dependientes del ángulo de elevación que existe entre el usuario y el satélite interceptado. Esto es evidente debido a que la cantidad de atmósfera que atraviesa la señal es menor cerca del cenit y mayor para ángulos de elevación pequeños. Para los fines del posicionamiento diferencial en el que se centra este trabajo, es importante remarcar que las características de la ionosfera y troposfera son dependiente de la zona, debido a los efectos climáticos. Este aspecto será de gran utilidad a la hora de analizar combinación de múltiples mediciones entre receptores con distinta ubicación.

Errores adicionales

Los errores adicionales pueden provenir de distintas fuentes o tener naturalezas completamente diferentes, pero de igual manera se juntan todas estas contribuciones en un término adicional. En principio este término contiene el ruido térmico propio del receptor y el de las etapas previas al mismo. Además de ruidos de fuentes externas que pueden sumarse a la señal. No es posible desafectar este término debido a su naturaleza aleatoria, y será parte de la estimación en las mediciones de pseudorange y fase de portadora. Otro efecto incluido en este termino es el de los errores debido al multicamino, que no se pueden considerar de naturaleza aleatoria ya que dependen de la geometría de la constelación GNSS en esa época, receptor y el medio en el cual esta inserto. La razón por la que no se pueden eliminar mediante filtrado pasa bajos es porque no tienen media nula.

1.5. Determinación de la posición

Para determinar la posición, el usuario debe medir los rangos a cada satélite y resolver su posición mediante la combinación de estas. Para lograr la solución de posición se utilizan distintas observaciones, 4 mediciones son necesarias para poder obtener la solución puntual. Pero también se puede utilizar información redundante para obtener una solución más confiable, pudiendo aplicar algún tipo de estimación de mínimos cuadrados o simplemente para validar la solución obtenida. El sistema de ecuaciones a resolver parte de plantear el verdadero rango entre el usuario y cada satélite como

$$\|\mathbf{s}^j - \mathbf{u}\| = \rho_r^{s,j} - c(t_u - \delta t^j) \quad (1.8)$$

con

$$t_u = t_r - t. \quad (1.9)$$

Siguiendo la notación como sigue

$\mathbf{s}^j = (x^j, y^j, z^j)$: vector de posición tridimensional del satélite j-esimo.

$\mathbf{u}^j = (x_u, y_u, z_u)$: vector de posición tridimensional del usuario.

$\rho_r^{s,j}$: pseudorange entre el usuario y el satélite i-esimo.

t_r : tiempo del receptor.

t : tiempo del sistema.

t_u : sesgo entre el tiempo del receptor y el tiempo del sistema.

δt^j : sesgo entre el tiempo del satélite y el tiempo del sistema.

Las posiciones están en coordenadas ECEF y se puede considerar que δt^j es nulo ya que al momento de computar el tiempo de transmisión de la señal el mismo fue corregido para estar sincronizado con el tiempo del sistema. Con esta asunción cada pseudorango resulta

$$\rho_r^{s,j} = \|\mathbf{s}^j - \mathbf{u}\| + ct_u = \sqrt{(x^j - x_u)^2 + (y^j - y_u)^2 + (z^j - z_u)^2} + ct_u . \quad (1.10)$$

Si se toman mediciones de múltiples satélites se obtiene un sistema de ecuaciones no lineales para resolver \mathbf{u} y t_u . Es común en la literatura realizar una linealización en torno a una posición estimada del usuario $\hat{\mathbf{u}}$ [2](pag 54), para esto se definen los pseudorangos estimados como

$$\hat{\rho}_r^{s,j} = \sqrt{(x^j - \hat{x}_u)^2 + (y^j - \hat{y}_u)^2 + (z^j - \hat{z}_u)^2} + \hat{c}t_u = \hat{r}_r^{s,j} + \hat{c}t_u . \quad (1.11)$$

Se puede observar la definición de $\hat{r}_r^{s,j}$ por simplicidad de la notación. Al linealizar $\rho_r^{s,j}$ en torno a la posición estimada $\hat{\mathbf{u}}$, es posible obtener una expresión para el pseudorango que se quiere calcular en función de (1.11). Esta expresión resulta

$$\rho_r^{s,j} = \hat{\rho}_r^{s,j} - \frac{(\mathbf{s}^j - \hat{\mathbf{u}})\Delta\mathbf{u}}{\hat{r}_r^{s,j}} + c\Delta t_u . \quad (1.12)$$

El incremental de posición del usuario respecto a su posición estimada ($\Delta\mathbf{u}$) esta escalado por el rango entre la posición estimada del usuario y el satélite, es decir la diferencia de los vectores posición de cada uno. Este termino es dividido por la norma de este vector diferencia $\hat{r}_r^{s,j}$, por lo que resulta en un vector unitario que apunta desde la posición estimada del usuario al satélite j -ésimo. Siendo las componentes de este vector los cosenos directores del vector $(\mathbf{s}^j - \hat{\mathbf{u}})$, no es otra cosa que el vector unitario linea de vista (*LOS* por sus siglas en ingles). De esta manera se define

$$\mathbf{a}^j = \frac{\mathbf{s}^j - \hat{\mathbf{u}}}{\hat{r}_r^{s,j}} . \quad (1.13)$$

El sistema de ecuaciones a resolver en función de los sesgos de los pseudorangos $\Delta\rho_r^{s,j} = \hat{\rho}_r^{s,j} - \rho_r^{s,j}$ se puede escribir como

$$\Delta\boldsymbol{\rho}_r^s = \begin{bmatrix} \Delta\rho_r^{s,1} \\ \Delta\rho_r^{s,2} \\ \vdots \\ \Delta\rho_r^{s,N} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{a}^1 & 1 \\ \mathbf{a}^2 & 1 \\ \vdots & 1 \\ \mathbf{a}^N & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_u \\ \Delta y_u \\ \Delta z_u \\ -c\Delta t_u \end{bmatrix} = \mathbf{H}^N \cdot \Delta\mathbf{x}_u . \quad (1.14)$$

La matriz \mathbf{H}^N solo depende de la geometría entre los satelites en vista (o utilizados para resolver posicion) y el usuario. La cantidad mínima de mediciones de pseudorango que se precisa para resolver posición y sesgo en tiempo es $N = 4$, en este caso es posible hallar el vector $\Delta\mathbf{x}_u$ multiplicando por izquierda al vector de sesgos de pseudorango por la matriz \mathbf{H}^N inversa. Si todas las mediciones de pseudorango son coherentes el sistema esta univocamente determinado. Puede interpretarse que la ubicación del usuario se

resuelve con mediciones de tres satélites (en caso de que no hubiese error de tiempo alcanza con esto) y se agrega una cuarta medición para poder resolver el sesgo de reloj entre el usuario y el satélite.

Como ya fue mencionado, se pueden usar más mediciones de las necesarias para resolver unívocamente el sistema. Con esto lo que se logra es validar la solución obtenida con mediciones de otros satélites, o incluso obtener información redundante para poder realizar una estimación de la posición. En particular, para casos donde $N > 4$ la matriz \mathbf{H}^N deja de ser cuadrada, por lo que no podemos resolver como se enunció para el caso $N = 4$. En esta situación se trabaja multiplicando por izquierda por la matriz \mathbf{H}^N transpuesta obteniendo

$$\mathbf{H}^{NT} \cdot \Delta \boldsymbol{\rho}_r^s = \underbrace{\mathbf{H}^{NT} \mathbf{H}^N}_{4 \times 4} \Delta \mathbf{x}_u. \quad (1.15)$$

De manera que se forma una matriz de 4×4 a la cual se le puede obtener la inversa y así hallar la solución mediante mínimos cuadrados como

$$\Delta \mathbf{x}_u = (\mathbf{H}^{NT} \mathbf{H}^N)^{-1} \cdot \mathbf{H}^{NT} \cdot \Delta \boldsymbol{\rho}_r^s. \quad (1.16)$$

Cabe aclarar que si el punto de linealización está lo suficientemente cerca de la posición verdadera del usuario, no hace falta realizar una iteración del procedimiento para obtener una solución. En cambio, si se parte de una posición estimada que no se acerca a la real, se deberá iterar utilizando como nueva posición aproximada la solución que devuelve el método. Este procedimiento es repetido hasta lograr una solución aceptable, es por esto que para obtener la solución en frío, un receptor puede demorar bastante tiempo según cual sea el grado de calidad de la información a priori que conozca de su posición.

Con esto se plantean las bases y conceptos principales del funcionamiento de los sistemas GNSS, siempre haciendo foco en el posicionamiento absoluto. Se detallaron los errores que están involucrados en las mediciones, dando lugar a reflexionar sobre formas de corregirlos o mitigarlos. Las mediciones de pseudorango son de utilidad para resolver la posición pero tienen grandes errores debido a que se generan en el *DLL*. La precisión que aportan las mediciones de fase de portadora es mucho mayor pero presentan el inconveniente de contar con ambigüedades. Sin tenerlas resueltas, lo cual no es trivial, se pierde esta ganancia en precisión. De aquí es natural continuar con el desarrollo de las mediciones en diferencias o posicionamiento relativo, que da lugar a formas de resolver estas ambigüedades y obtener soluciones ordenes de magnitud más precisas. Para esto se aprovechan las características de los errores presentes en la medición. Por otro lado, se esboza el proceso de generación de las mediciones en el caso más general, además del procedimiento que permite obtener una solución de posición del receptor. Esto es un buen punto de partida para plantear la implementación de este proceso en un sistema embebido donde las prestaciones son limitadas, por lo tanto, también la capacidad de procesamiento.

Capítulo 2

GNSS diferencial

Este capítulo presenta los conceptos del posicionamiento relativo, introduciendo la combinación de mediciones de múltiples satélites o múltiples receptores. Se desarrolla el concepto de GNSS diferencial haciendo foco en la posibilidad de resolución de ambigüedades en las mediciones de fase de portadora que quedó sin resolver en el enfoque del capítulo anterior. Además, se detallan los aspectos más importantes de la estandarización de los mensajes para la comunicación entre los receptores que trabajan en red en un enfoque de posicionamiento diferencial cinemático.

2.1. Introducción

Un receptor GNSS operando sin ayuda externa puede lograr soluciones con precisión menor a las decenas de metros, incluso consiguiendo estar en el orden de los metros. Esto es debido a que se utilizan mediciones de pseudorango para obtener la solución, y como se desarrolló en el Capítulo 1 las mismas son más ruidosas que las mediciones de fase de portadora. En algunas aplicaciones críticas la precisión lograda no es suficiente, se precisan soluciones de posición con mayor precisión. Para esto es necesario ayudar al receptor a obtener una solución con información externa o interna, una forma de realizar esto de manera interna es con GNSS diferencial haciendo uso de mediciones de fase. Un ejemplo del uso de información externa puede ser con sensores que obtienen parámetros inerciales del vehículo, y que el receptor GNSS utilice estos datos para mejorar su solución.

Para poder utilizar las mediciones de fase de portadora es necesario de alguna manera resolver las ambigüedades en longitudes de onda que presentan las mismas. Existen métodos de resolución de ambigüedades que logran fijar su valor, los mismos se basan en formar mediciones en diferencias para poder cancelar distintas contribuciones que tiene la medición individual. Lo que se consigue con esto es aislar los términos que se quieren estimar, según cómo se diseñe la combinación de mediciones es posible cancelar los términos indeseados para contar únicamente con las ambigüedades y ruido a la hora de la estimación. Una vez resueltas las ambigüedades se puede explotar toda la utilidad de las mediciones de fase de portadora. Las mismas son equivalentes a una medición de pseudorango, pero con un error de más de dos ordenes de magnitud menor ya que se obtienen en el PLL, esto equivale a un nivel de ruido del orden de los milímetros. Esto permitiría obtener una solución de posición con una precisión de algunas decenas de centímetros o incluso menos.

Al formar una red de receptores que pueden trabajar en conjunto es posible des-afectar errores en las mediciones tales como efectos atmosféricos que son altamente dependientes de la ubicación del receptor o los receptores. Los mismos deben comunicarse entre ellos enviando mensajes estandarizados por la Comisión Técnica de Radio para Servicios Marítimos (*RTCM* por sus siglas en inglés), de manera que logran obtener soluciones puntuales para cada receptor en la red y además se pueden obtener las posiciones relativas entre los mismos.

2.2. Múltiples mediciones combinadas

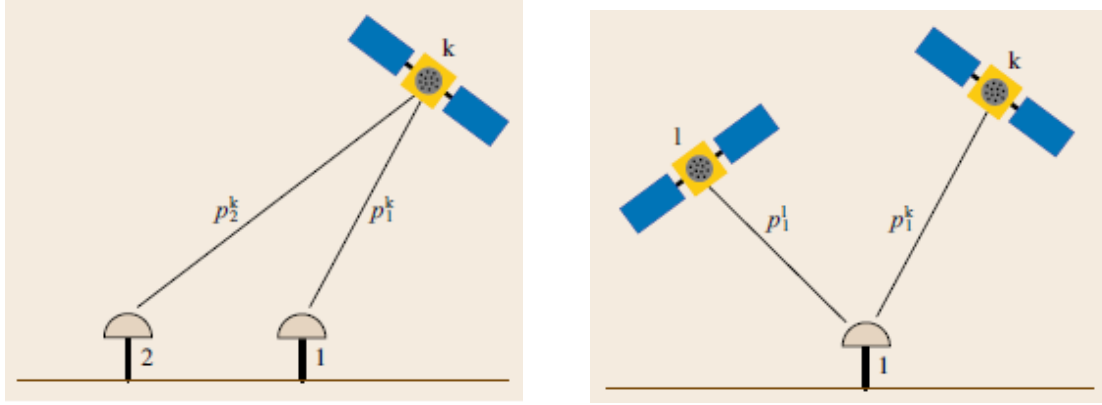
La acción de tomar múltiples mediciones y combinarlas para poder cancelar algunos de los términos, es de gran utilidad, y uno de los principales fundamentos para el posicionamiento diferencial en el que esta centrado este trabajo. Resulta de particular interés para poder proveer soluciones de posición más precisas, conocer los términos de error presentes en las ecuaciones de observación (Sección 1.4). Para esto se aprovecha la correlación espacial y temporal que existe entre algunos de estos fenómenos para las distintas mediciones, ya sea modificando la geometría del problema, u observando en múltiples épocas.

Las múltiples mediciones pueden hacer uso de señales de múltiples satélites con un receptor único o de una única señal recibida por múltiples receptores. En caso de contar con mediciones que no hayan sido tomadas en el mismo instante, el receptor podría propagar las mismas de manera que queden alineadas a una época común. Pero para aplicaciones de precisión como las que se plantean con este enfoque no es conveniente ya que un el desplazamiento de un satélite GNSS es muy grande incluso en pequeños intervalos de tiempo. Para poner magnitudes, por ejemplo, en un periodo de 1 segundo los satélites se desplazan casi 4 km.

2.2.1. Simples diferencias

Las observaciones combinadas de simples diferencias entre receptores (BRSD por sus siglas en inglés) consisten en la diferencia de observaciones de un único satélite, usando dos receptores distintos (Fig. 2.1a). También se puede realizar la diferencia de observaciones de dos señales (satélites) en el mismo receptor (BSSD por sus siglas en inglés), la cual se denomina simples diferencias entre satélites (Fig. 2.1b). Cabe destacar que las diferencias tomadas aquí son denominadas simples pues consisten en una medición de rango entre un usuario y un satélite, el rango se puede formar con medición de pseudorango o *doppler* acumulado de portadora. Existen enfoques donde las mediciones que son diferenciadas son observables combinados, es decir, una combinación lineal de pseudorangos y mediciones de fase de distintas señales, no pudiendo llamarlas observaciones simples.

La nomenclatura correspondiente a cada medición se da con el operador ∇ para simples diferencias entre satélites y Δ cuando es entre receptores. Además se agregan índices para poder identificar a los receptores y satélites. En el superíndice se indica al satélite (o par de satélites diferenciados) y en el subíndice se indica al receptor (o par de receptores diferenciados).



(a) Diferencia entre receptores con un único satélite (BRSD). (b) Diferencia entre satélites con un único receptor (BSSD).

Figura 2.1: Esquema del armado de combinación de simples diferencias.

Entre receptores

El pseudorango resultante de la BRSD es

$$\Delta p_{12}^k = p_2^k - p_1^k = \rho_{12}^k + c d_{12}^k + \zeta_{12}^k + c \left(dt_{12} + \delta t_{stc,12}^{rel,k} \right) + I_{12}^k(bl) + T_{12}^k(bl) + e_{12}^k. \quad (2.1)$$

La fase de portadora que se forma es

$$\Delta \varphi_{12}^k = \varphi_2^k - \varphi_1^k = \rho_{12}^k + c \left(dt_{12} + \delta t_{stc,12}^{rel,k} \right) + c \delta_{12}^k + \zeta_{12}^k - I_{12}^k(bl) + T_{12}^k(bl) + \lambda \left(\omega_{12}^k + N_{12}^k \right) + \epsilon_{12}^k. \quad (2.2)$$

Comparando con las Ecuaciones (1.1) y (1.2) se puede observar como se cancelan los términos que son compartidos, tales como el retardo instrumental del satélite y el sesgo en el reloj del satélite. Se conserva el término de retardo de instrumental diferencial en el receptor, debido a que solo podría cancelarse en caso de que ambos receptores cuenten con etapas de correladores y *front-end* idénticos.

Por otro lado, los términos correspondientes a los retardos atmosféricos pasan a ser dependientes de la línea de base entre ambos receptores. Esto se debe a la correlación espacial que tienen estos fenómenos, cuanto menor sea la línea de base se puede considerar que estos términos son eliminados debido a que la señal atraviesa fragmentos de la atmósfera con similares características. Si bien son conservados, para líneas bases pequeñas comparadas con la distancia a los satélites pueden ser despreciados frente a errores de multicamino y propios del ruido del receptor.

En la medición de fase de portadora en simples diferencias se agregan el término de corrección de *wind-up* de fase y de ambigüedad entera de fase, ambos diferenciales. En general, para aplicaciones en Tierra con línea base no muy grande el que se menciona primero puede ser despreciado, debido a que las antenas están apuntando hacia arriba. En cambio, en aplicaciones donde los receptores se encuentran en vehículos espaciales esto dejaría de ser posible debido a diferencias de altura entre los mismos o por las líneas base más grandes que se presentan.

Entre satélites

El pseudorango para el caso BSSD resulta

$$\nabla p_1^{k1} = p_1^1 - p_1^k = \rho_1^{k1} + cd_1^{k1} + \xi_1^{k1} + c(dt^{k1} + \delta t^{rel,k1}) + I_1^{k1}(bl) + T_1^{k1}(bl) + e_1^{k1}. \quad (2.3)$$

Y para la fase de portadora

$$\begin{aligned} \nabla \varphi_1^{k1} = p_1^1 - p_1^k = \rho_1^{k1} + c(dt^{k1} + \delta t^{rel,k1}) + c\delta_1^{k1} + \zeta_1^{k1} + T_1^{k1}(bl) - I_1^{k1}(bl) \\ + \lambda^1(\omega_1^1 + N_1^1) - \lambda^k(\omega_1^k + N_1^k) + \epsilon_1^{k1}. \end{aligned} \quad (2.4)$$

En este caso los términos que se cancelarán son los compartidos debido a que se utiliza un único receptor. En particular, el sesgo de reloj debido al efecto relativista es cancelado tanto como el sesgo de reloj del receptor. En cuanto al retardo instrumental solo podremos indicar que el mismo se cancela si se utilizó la misma señal de ambos satélites. Esto es debido a que el retardo que corresponde a la parte analógica esta dominado por el retardo inherente a los filtros pasa banda en la etapa de RF del receptor. Como estos filtros no son iguales para todas las señales, entonces no se puede decir que para distintas señales se cancelan los retardos, también dejando en evidencia que estos retardos son propios de cada receptor [4].

En definitiva, se mantiene el retardo instrumental diferencial de los satélites. Los efectos atmosféricos pueden estar correlacionados o no, según si los satélites adquiridos se encuentran en posiciones cercanas o no. Como esta situación no resulta común y en principio se puede adquirir cualquier par de satélites, se considera para el caso general que los retardos debido a los efectos atmosféricos se mantienen.

2.2.2. Dobles diferencias

Las mediciones en dobles diferencias (DD de aquí en más) se construyen mediante la diferenciación de dos simples diferencias, se pueden diferenciar dos mediciones BRSD con dos satélites distintos o dos mediciones BSSD con dos receptores distintos. Es evidente que será necesario contar con disponibilidad de un par de receptores y un par de satélites en vista para ambos receptores (ver Fig. 2.2). Este tipo de mediciones son de particular interés ya que logran cancelar otros términos que las mediciones de simples diferencias detalladas en la Sección 2.2.1 no lograban. La notación adoptada para las mediciones de dobles diferencias es $\Delta \nabla p_{12}^{k1}$ en el caso de pseudorango y para fase de portadora resulta equivalente. Si bien se diferencian dos BRSD, cada una con un satélite distinto, esto equivale a

$$\begin{aligned} \Delta \nabla (\cdot)_{12}^{k1} = \Delta (\cdot)_{12}^1 - \Delta (\cdot)_{12}^k &= \left[(\cdot)_2^1 - (\cdot)_1^1 \right] - \left[(\cdot)_2^k - (\cdot)_1^k \right] \\ &= \left[(\cdot)_2^1 - (\cdot)_2^k \right] - \left[(\cdot)_1^1 - (\cdot)_1^k \right] = \nabla (\cdot)_2^{k1} - \nabla (\cdot)_1^{k1}. \end{aligned} \quad (2.5)$$

Por lo que podemos pensar a las dobles diferencias como una BRSD y una BSSD, por eso es que obtienen la ganancia respecto a cancelación de términos comparadas con unas SD. De manera que este nuevo operador es una combinación de los operadores vistos en la Sección 2.2.1. La medición en DD con dos mediciones BRSD para pseudorango resulta

$$\Delta \nabla p_{12}^{k1} = \Delta p_{12}^1 - \Delta p_{12}^k = \rho_{12}^{k1} + \xi_{12}^{k1} + T_{12}^{k1}(bl) + I_{12}^{k1}(bl) + e_{12}^{k1}. \quad (2.6)$$

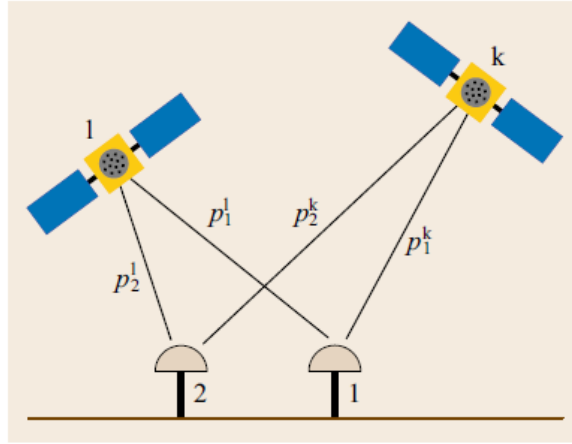


Figura 2.2: Configuración de receptores y satélites necesaria para doubles diferencias (DD).

En el caso de fase de portadora se obtiene

$$\varphi_{12}^{k1} = \rho_{12}^{k1} + \zeta_{12}^{k1} + T_{12}^{k1}(bl) - I_{12}^{k1}(bl) + \lambda (\omega_{12}^{k1} + N_{12}^{k1}) + \epsilon_{12}^{k1} . \quad (2.7)$$

En estas mediciones se logra cancelar los sesgos de reloj del receptor que no se habían cancelado en las Ecuaciones (2.1) y (2.2). Además el término diferencial de corrección relativista es eliminado ya que son iguales para todas las mediciones de BRSD sin importar qué satélite se tome. Los retardos instrumentales diferenciales entre los receptores se cancelan al utilizar el mismo par de receptores, en caso de estos receptores estén diseñados de manera correcta y se pueda considerar que los retardos se compensan para las distintas frecuencias. Los términos de retardo atmosférico se mantendrán siempre y cuando no haya correlación entre las mediciones, es por esto que es explícita la dependencia de los mismo con la longitud de la línea de base. Ya se puede considerar que para SD estos términos pueden ser despreciados frente a los errores, es decir que con esta combinación tenemos más argumentos para poder hacerlo. Para líneas de base no muy grandes estos términos son tan pequeños que no se tienen en cuenta, esto es valido ya que se combinaron observaciones BRSD para dos satélites distintos por lo que el remanente es prácticamente nulo.

2.2.3. Triples diferencias

Además de la correlación espacial que tienen los fenómenos que todavía no se han cancelado completamente, los mismos cuentan con una correlación temporal que no se ha podido tener en cuenta todavía. Esto se debe a que las mediciones en SD y DD, todas son haciendo diferencias de observaciones en la misma época. Las mediciones en triples diferencias se realizan mediante dos DD pero en distintas épocas, esto permite sacar provecho de la dinámica lenta que tienen los efectos atmosféricos. La notación tomada para identificar estas mediciones es ∂p_{12}^{k1} .

La medición en triples diferencias de pseudorange y fase de portadora resulta

$$\partial p_{12}^{k1} = p_{12}^{k1}(t_i) - p_{12}^{k1}(t_{i-1}) = \partial \rho_{12}^{k1} + \partial \zeta_{12}^{k1} + \partial T_{12}^{k1}(\Delta t, bl) + \partial I_{12}^{k1}(\Delta t, bl) + \partial \epsilon_{12}^{k1} , \quad (2.8)$$

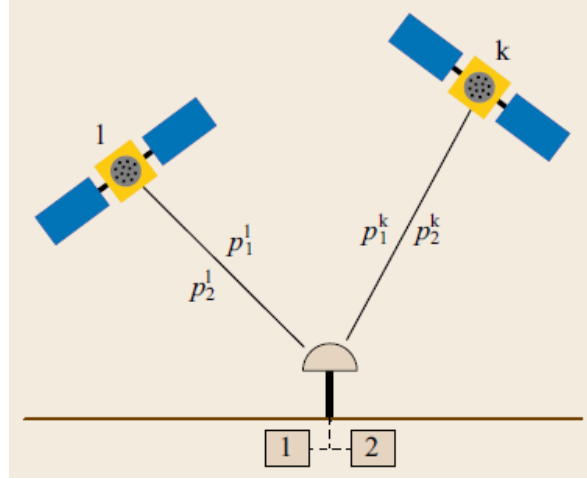


Figura 2.3: Configuración con línea de base nula.

$$\partial\varphi_{12}^{k1} = p_{12}^{k1}(t_i) - p_{12}^{k1}(t_{i-1}) = \partial\rho_{12}^{k1} + \partial\zeta_{12}^{k1} + \partial T_{12}^{k1}(\Delta t, bl) - \partial I_{12}^{k1}(\Delta t, bl) + \partial\epsilon_{12}^{k1} + \partial\omega_{12}^{k1}. \quad (2.9)$$

Además de los términos que ya no estaban presentes en las DD y lo que se han reducido las contribuciones atmosféricas, según qué tan grande es la diferencia de épocas tomada $\Delta t = t_{i-1} - t_i$ en comparación con la dinámica del fenómeno, podremos despreciar aún más estos términos. Es evidente que si la correlación espacial presente en los términos no fue suficiente como para despreciarlos, con un correcto diseño en este enfoque se consigue despreciarlos definitivamente.

2.2.4. Línea de base nula

Este enfoque para armar las observaciones puede ser utilizado ya sea con simples diferencias tanto como con dobles diferencias. Es un caso particular de las ya mencionadas donde se utiliza la misma antena para ambos receptores, se divide la señal y cada receptor hace sus mediciones como se observa en la Fig. 2.3. Esto consigue que la correlación espacial sea completa debido a que la línea de base nula implica que ambos receptores usan la misma antena, por lo que la señal recorre el mismo camino para ambos, es decir, es afectada por los mismos fenómenos. Resulta de gran utilidad para la calibración de los receptores por los resultados que se obtienen. Pero en principio como geometría para posicionamiento diferencial no tiene utilidad ya que ambos receptores tienen la misma ubicación.

En el caso de las simples diferencias no tiene sentido considerar entre satélites ya que no aprovecharíamos la línea de base nula, por lo que se trabajara entre receptores. Podemos analizar los términos remanentes en la Ecuación (2.1) y (2.2). En principio se mantiene el término debido al sesgo de reloj y retardo de hardware del receptor. Si bien la antena es la misma, los receptores son independientes por lo que el retardo de reloj no tiene por qué ser igual. Incluso en un caso desfavorable los receptores podrían no estar cerca y que la división de la señal implique un camino mas largo para un receptor que para otro. Se considerará que el retardo instrumental diferencial será nulo con el mismo criterio que se detalló en las secciones anteriores. Siendo cauteloso en que el diseño de los receptores es el correcto y que los cables entre el divisor de potencia y los receptores

tienen el mismo largo, podemos obviarlo. Hasta acá no hay cambios con respecto al caso de receptores con antenas separadas, excepto que el rango entre ambos receptores es nulo. El cambio sustancial aparece cuando los términos de retardos atmosféricos ya son cancelados completamente en las SD ya que el camino de la señal es el mismo para ambas mediciones. El sesgo debido al centro de fase de la antena y la corrección del *wind-up* de fase es el mismo para ambos receptores ya que utilizan la misma antena, por esto su contribución diferencial desaparece. Las ecuaciones resultantes son

$$p_{12,ZB}^k = cdt_{12} + e_{12}^k, \quad (2.10)$$

$$\varphi_{12,ZB}^k = cdt_{12} + \lambda N_{12}^k + \epsilon_{12}^k. \quad (2.11)$$

Al momento de tomar DD ya hay muchos términos que fueron cancelados de antemano, pero sigue resultando en ganancia ya que se cancela el sesgo de reloj entre los dos receptores que es común en ambas mediciones diferenciales. Las mediciones en DD para fase de portadora resultan

$$\varphi_{12,ZB}^{k1} = \lambda N_{12}^{k1} + \epsilon_{12}^{k1}. \quad (2.12)$$

No se especifica como resulta la DD para pseudorango ya que al considerar que el retardo instrumental se cancela solo tendremos errores aleatorios. En estos errores solo queda remanente el ruido ya que la contribución multicamino es cancelada en BRSD pues el angulo de incidencia de la señal es el mismo para ambos receptores, es decir, tienen los mismo rebotes, por lo tanto multicamino.

2.3. Resolución de ambigüedades en mediciones de fase de portadora

Poder resolver las ambigüedades de fase como números enteros es una cuestión clave para enfoques de posicionamiento de alta precisión. Una vez resueltas estas ambigüedades es posible utilizar las mediciones de fase como rangos con gran precisión. Este mecanismo se basa en la inferencia conjunta de parámetros enteros y reales, ya que además de estimar las ambigüedades enteras existen contribuciones reales debido al rango y distintos retardos en la señal aparte del ruido. Como se desarrollo en la Sección 2.2, se pueden cancelar términos de las ecuaciones de observación realizando mediciones combinadas en diferencias. De esta manera se mostró que es posible aislar el término correspondiente al número entero de longitudes de onda de ambigüedad en la medición, hasta dejarlo solo en presencia de ruido en el caso de las dobles diferencias. Es valido considerar que se mantienen enteras ya que la diferencia de dos números enteros lo sigue siendo. De esta manera es posible sacar provecho de la restricción y acotar el conjunto de soluciones posibles a la estimación a un conjunto de enteros. Es parte del diseño del algoritmo elegir de manera adecuada el conjunto de potenciales soluciones, de modo que el valor correcto se encuentre dentro del mismo pero que no sea lo suficientemente extenso como para que la búsqueda dentro del conjunto lleve mucho procesamiento.

Los esquemas más comunes pueden dividir el procedimiento en tres etapas, que no necesariamente podrían ser todas alcanzadas durante la ejecución del algoritmo. Las mismas se dividen en el tipo de solución buscada y encontrada, cuando la ambigüedad

estimada es flotante, cuando la misma es entera y por último cuando las ambigüedades fueron fijadas.

- Solución flotante

Para comenzar con la estimación se debe quitar la restricción de que los valores estimados son enteros. Aquí se realiza una estimación de mínimos cuadrados convencional obteniéndose el conjunto de soluciones con su matriz de covarianza.

- Solución entera

Aquí se vuelve a restringir las soluciones a valores enteros, existen distintos métodos de restricción tales como redondeo al entero más cercano o mínimos cuadrados enteros (*ILS* por sus siglas en inglés).

- Solución fija

Cuando la solución entera obtenida en la etapa previa es aceptable se procede a fijar estos valores de ambigüedades, de manera que se pueda reajustar el estimador flotante con la diferencia entre el valor fijado y el valor flotante. Es decir, buscar el valor entero en un entorno cercano a la solución flotante. La calidad de solución que se obtiene al alcanzar el estado fijado está en el orden de la precisión de las mediciones de fase, siempre que se considere alta la probabilidad de que el valor fijado sea el correcto.

Es evidente que para poder llegar a fijar las ambigüedades es necesario tomar muestras en múltiples épocas, donde el tiempo para llegar a este punto es dependiente de la calidad de las mediciones y de lo restrictivo que sea el algoritmo a la hora de la estimación. Lo desarrollado en esta sección introduce conceptualmente la resolución de ambigüedades en mediciones GNSS y simplemente a modo informativo se mencionan algoritmos que implementan lo aquí desarrollado. El algoritmo que mayor popularidad tiene actualmente es un enfoque de descorrelación de ambigüedades mediante mínimos cuadrados (*LAMBDA* por sus siglas en inglés), el mismo es utilizado en distintas aplicaciones tales como el posicionamiento de red global, vuelos satelitales en formación o teledetección por radar interferométrico de apertura sintética (*InSAR*). En el lugar de trabajo donde se llevó a cabo este trabajo fue desarrollado otro algoritmo con un enfoque bayesiano de resolución de ambigüedades (*BART* por sus siglas en inglés) [5].

2.4. Real Time Kinematics

La verdadera ganancia del posicionamiento relativo surge de poder obtener soluciones haciendo uso de mediciones de fase. GNSS diferencial no solo consiste en posicionamiento diferencial si no también en la resolución de las ambigüedades explicada en la sección anterior (2.3). Se denomina cinemática de tiempo real (*RTK* por sus siglas en inglés), por considerar que los receptores que trabajan en conjunto han podido resolver y fijar las ambigüedades en tiempo real para utilizar las mediciones de fase con alta precisión. Si bien el caso general está especificado para receptores en movimiento se podría pensar en situaciones con algunos receptores o incluso todos, en posiciones estáticas.

En el caso de contar con dos receptores, es natural denominar a uno como base y a otro como rover (del inglés de receptor móvil). En general la base está estática y es la que

envía las correcciones al rover, aprovechando que está estática la misma podrá refinar su solución de posición haciendo uso de un modelo adecuado a la dinámica que presenta. Con esta consideración tiene sentido pensar que la base tiene una solución mucho más precisa que la del rover, por eso es quien envía las correcciones para que el rover (en movimiento o no) pueda obtener una solución de posición basada en mediciones de fase. Incluso podrían agregarse varias bases y rovers, obteniendo una red *RTK*. De lo desarrollado aquí se puede ver que las bases serán los receptores que envían las correcciones y los rovers quienes las reciben y utilizan para resolver su posición mediante procesamiento diferencial de mayor precisión.

La calidad de la resolución de las ambigüedades y por ende de la solución de posición está directamente relacionada con la geometría que presentan los receptores y los satélites al momento de la medición. Es por esto que al considerar situaciones estáticas, las cuales no tienen fija la geometría entre receptores, es más difícil para el rover lograr fijar las ambigüedades y trabajar a precisión de las mediciones de fase. Si bien la constelación de satélites GNSS está en constante movimiento, su dinámica no es lo suficientemente rápida como para considerar una geometría cambiante. Esto no quiere decir que no se puede fijar ambigüedades, simplemente le llevará más tiempo.

La razón por la que hablamos de cambios de geometría es porque los métodos de resolución de ambigüedades (Sección 2.3) precisan mediciones de múltiples épocas para resolverlas. Y la diferencia entre épocas es la geometría entre los receptores y los satélites GNSS, de aquí es que tiene más sentido hablar de cambios de geometría. Volviendo al caso estático, se ve que el tiempo de resolución es mayor ya que se debe esperar periodos más largos para obtener el cambio de geometría necesario para resolver las ambigüedades. Al contar con pequeños cambios de geometría la precisión de la solución estará dominada por la precisión lograda con mediciones de pseudorange. Y en el caso límite donde se cuenta con una única época es equivalente a resolver posición con pseudorange.

2.5. Estándar RTCM v3.3

Entre las bases y rovers trabajando en un esquema de posicionamiento relativo se envían mensajes de corrección para poder lograr el objetivo planteado para cinemática de tiempo real en la sección anterior. El enlace de comunicación para estos mensajes está estandarizado por la Comisión Radio Técnica para Servicios Marítimos (*RTCM* por sus siglas en inglés). Existen múltiples versiones de este estándar, donde las actualizaciones agregan servicios y mensajes que se pueden transmitir. En sus comienzos solo estaban estandarizadas las correcciones de pseudorange, pero a partir de la versión 2.1 del estándar se agregan las correcciones a mediciones de fase. Hasta ese momento no era posible el enfoque *RTK* planteado anteriormente ya que sin las correcciones de fase de portadora no se lograba resolver las ambigüedades en esta medición. Si bien este trabajo está enfocado únicamente en un par de receptores (base y rover), a partir de la tercera versión del estándar se agrega la posibilidad de trabajar en redes *RTK* como las que ya se mencionaron. En particular se utiliza la versión del estándar RTCM 10403.3 (Versión 3.3) para servicios de GNSS diferencial [6].

Desde el comienzo del trabajo se planteó que las ideas generales del mismo son aplicables a múltiples sistemas GNSS, pero que la implementación específica y validación se han realizado sobre el sistema GPS. Por esta razón es que solo se analizarán los men-

Preambulo	Reservado	Largo del mensaje	Contenido del mensaje	Bits de paridad
8 bits	6 bits	10 bits	Largo variable (número entero de bytes)	24 bits
11010011	000000	Largo del mensaje [bytes]	0-1023 [bytes]	CRC-24Q

Tabla 2.1: Estructura del mensaje RTCM (versión 3.3).

sajes particulares para correcciones de pseudorango y fase de portadora en el sistema GPS. Aunque por la organización y modularización del estándar lo que se desarrolla es extrapolable a otras constelaciones GNSS, solo debiendo analizar en detalle los campos específicos de los mensajes que aquí no se tratan.

En términos generales este documento cuenta con la estandarización de mensajes para los sistemas GPS, GLONASS, Galileo, SBAS, QSZZ, BDS. El rango de mensajes desde 1 hasta 100 es reservado a mensajes experimentales, luego comienzan a partir del 1000. Aquí es donde se pueden encontrar mensajes de descripción de las antenas, descripción de las estaciones base, mensajes de observables y correcciones varias al operar en una red *RTK*. Cada mensaje tiene un identificador de tipo dado por el número y contiene distintos campos dentro, estos campos pueden verse repetidos entre los distintos mensajes. Se identifican mediante DFXXX (por *Data Field*) y un número de tres dígitos.

Para la aplicación en la que está pensada este trabajo, como base una única estación estacionaria solo será necesario describir la estación y luego enviar esa información junto con los observables al rover (o rovers si hubieran más). Con este enfoque el rover cuenta con todos los datos para realizar el procesamiento diferencial internamente y en tiempo real.

2.5.1. Formato del mensaje

El formato que tomará el mensaje definirá por completo la capa de transporte de este enlace de comunicación entre receptores. Dando un formato común a todos los mensajes a transmitir se puede generalizar el proceso de codificación y decodificación de los mismos. Los mensajes tendrán un encabezado de 3 bytes, el contenido del mensaje será variable entre 0 y 1023 bytes, y por último, un pie de 3 bytes también.

En principio es necesario definir un preámbulo que será utilizado por el rover para definir el comienzo de un mensaje. El rover podría estar recibiendo múltiples mensajes consecutivos, de una o varias bases, a través de la detección del preámbulo en la secuencia de bits recibidos el mismo puede identificar un nuevo mensaje. El preámbulo es una secuencia de un byte correspondiente a 0xD3 en hexadecimal. Luego del preámbulo existen seis bits reservados que en la versión utilizada del estándar se especifican en cero, pero como está sujeto a modificaciones el software del receptor no debe utilizar estos seis bits en cero para la decodificación. Los diez bits restantes se llenan con el largo del mensaje (expresado en bytes), con un rango de 0 a 1023. Un esquema de lo explicado puede verse en la Tab. 2.1.

Luego del campo del mensaje, con largo variable, hay 3 bytes de pie que corresponden a los bits de paridad del mensaje. Corresponden a 24 bits de paridad con

CAMPO	Identificador de campo
Número de mensaje	DF002
Identificador de estación de referencia	DF003
Reservado	DF021
Indicador GPS	DF022
Indicador GLONASS	DF023
Reservado para Indicador Galileo	DF024
Indicador de estación de referencia	DF141
Punto de Referencia de la Antena (ARP) ECEF-X	DF025
Indicador de oscilador de único receptor	DF142
Reservado	DF001
Punto de Referencia de la Antena (ARP) ECEF-Y	DF026
Indicador de cuarto de ciclo	DF364
Punto de Referencia de la Antena (ARP) ECEF-Z	DF027

Tabla 2.2: Campos del mensaje de estación de referencia estacionaria (1005).

verificación de redundancia cíclica (*CRC* por sus siglas en inglés), se utiliza un código CRC de 24 bits propietario de Qualcomm (el mismo es llamado CRC-24Q). El mismo trabaja sobre el encabezado y el campo del mensaje, con un polinomio generador dado por

$$g(x) = \sum_{i=0}^{24} g_i x^i, \quad (2.13)$$

con

$g_i = 1$ para $i = 0, 1, 3, 4, 5, 6, 7, 10, 11, 14, 17, 18, 23, 24$. Y $g_i = 0$ en caso contrario.

2.5.2. Mensaje de la estación de referencia estacionaria

Existen tres mensajes para describir por completo las estaciones de referencia que actuarán como bases y sus antenas. Los mismos difieren en sutilezas, por eso se desarrollarán los campos del mensaje 1005 en particular (ver Tab. 2.2) y luego se comentarán las diferencias que presentan los otros dos. Los mismos son genéricos para cualquier sistema GNSS.

Número de mensaje Se especifica el número del mensaje (en este caso 1005).

Identificador de la estación de referencia En caso de contar con múltiples bases, el rover utiliza este campo para saber de qué base proviene el mensaje.

Indicador de sistema Está en alto si la base está enviando mensajes correspondientes al sistema en cuestión.

Indicador de la estación de referencia Indica si es una estación de referencia real (física) o si es una estación computada o no física, podría ser una estación de referencia virtual computada en base a múltiples estaciones de la red.

ARP (x,y,z) en ECEF La posición del punto de referencia de la antena de la base en coordenadas ECEF.

Indicador de oscilador de único receptor Indica que todas las observaciones crudas enviadas en el resto de los mensajes corresponden a mediciones en el mismo instante.

Indicador de cuarto de ciclo Indica si el fabricante del receptor que actúa como base tiene implementado un mecanismo para corregir los desfases de cuarto de ciclo de la fase de la portadora. Es decir que pueden asegurar que las mediciones de fase de distintas señales a una misma frecuencia están en fase y por lo tanto no presentan el desfase ya mencionado.

Es interesante analizar los rangos y resoluciones definidos para cada campo del mensaje. Esta información será de gran utilidad teniendo en cuenta que se busca implementar este protocolo de comunicación en un sistema embebido. Para mayor detalle se puede recurrir al Anexo (rangos-resoluciones-tipos de variables).

El mensaje 1006 presenta los mismos campos que el 1005 pero como es utilizado en aplicaciones específicas de geodesia, define la altura del ARP de manera distinta. Es decir, agrega información sobre la altura del ARP respecto de un marcador del que se conoce la posición con mucha precisión. Por otro lado, el mensaje 1033 describe la antena de la estación de referencia además de dar información del tipo de receptor utilizado en la estación. Esto permite al rover generar archivos RINEX [7] a partir de la información recibida.

2.5.3. Mensajes de múltiples señales

El estándar RTCM define los mensajes de observables dentro del rango de tipos de mensaje 1001-1004 para GPS, 1009-1012 para GLONASS. Hay mensajes particulares para cada sistema, lo cual trae complicaciones al pensar en agregar nuevos sistemas e incluso nuevas señales. Para poder generalizar los mensajes necesarios en un enfoque RTK de cualquier sistema GNSS se definen los mensajes de múltiples señales (MSM por sus siglas en inglés). Los mismos son universales para el envío de observables de cualquier sistema, lo que trae la ventaja de ya tener estandarizado los mensajes en caso de agregar disponibilidad de servicios RTK de nuevos sistemas en versiones futuras del estándar. Además de permitir generalizar según el sistema, los mismos también permiten agregar nuevas señales en las observaciones. Esto se logra compatibilizando los identificadores de señales con la tercera versión del estándar RINEX. El enfoque universal para los mensajes se logra debido a la similaridad que existe entre los observables de los sistemas operativos y los planeados.

Los mensajes MSM reemplazan a los mensajes antiguos que se mencionan para GPS y GLONASS, completando el conjunto de mensajes que no pueden faltar en el enlace de comunicación para lograr un enfoque DGNSS. Existen siete mensajes MSM que difieren en la información enviada y por lo tanto en la aplicación en la que tienen utilidad. En la Tab. 2.3 se puede observar los distintos campos que acepta cada uno de los mensajes, por lo que una descripción resumida de cada tipo de mensaje resulta de la siguiente manera.

- MSM 1: Información compacta de pseudorange.

	CAMPOS	MSM1	MSM2	MSM3	MSM4	MSM5	MSM6	MSM7
Parte satelital	Número entero de milisegundos en la parte gruesa del rango				DF397	DF397	DF397	DF397
	Información extendida del satélite					*		*
	Parte gruesa del rango modulo 1 ms	DF398	DF398	DF398	DF398	DF398	DF398	DF398
	Parte gruesa de la desviación en frecuencia					DF399		DF399
Parte de señal	Rangos finos de pseudorango	DF400		DF400	DF400	DF400	DF405 ¹	DF405 ¹
	Rangos finos de fase de portadora		DF401	DF401	DF401	DF401	DF406 ¹	DF406 ¹
	Tiempo de enganche de fase de portadora		DF402	DF402	DF402	DF402	DF407 ¹	DF407 ¹
	Indicador de ambigüedades de medio ciclo		DF420	DF420	DF420	DF420	DF420	DF420
	Relación portadora a densidad espectral de ruido				DF403	DF403	DF408 ¹	DF408 ¹
	Parte fina de la desviación en frecuencia					DF404		DF404

Tabla 2.3: Campos de los distintos tipos de mensajes MSM (me esta costando el formato jeje).

- MSM 2: Información compacta de fase de portadora.
- MSM 3: Información compacta conjunta de pseudorango y fase de portadora.
- MSM 4: Información completa de pseudorango y fase de portadora, con relación portadora a densidad espectral de ruido (C/N_0).
- MSM 5: Idéntico a MSM 4 pero agrega la desviación de la portadora (medición de *doppler*).
- MSM 6: Idéntico a MSM 4 pero con resolución extendida.
- MSM 7: Idéntico a MSM 5 pero con resolución extendida.

El mensaje MSM 1 puede ser utilizado en GNSS diferencial convencional y avanzado. El MSM 2 tiene gran utilidad cuando la tasa del enlace de comunicación RTCM es baja

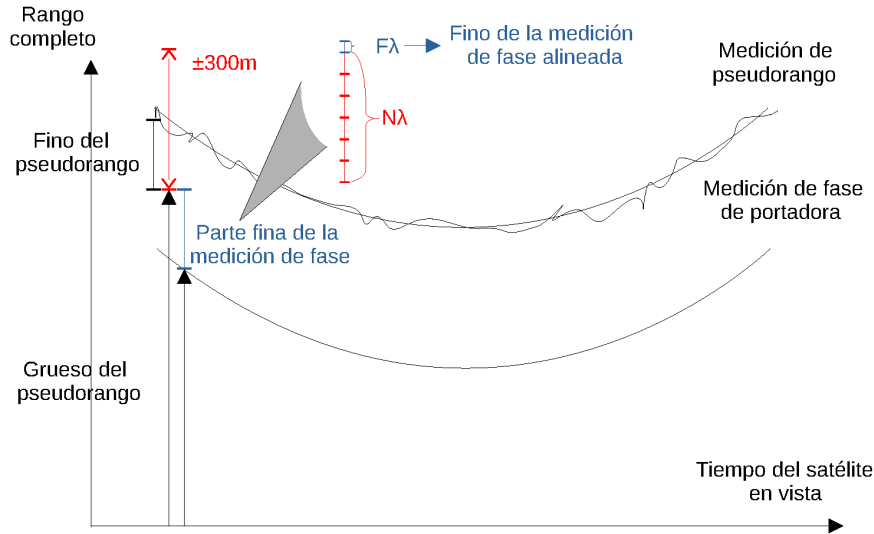


Figura 2.4: Rango al satélite durante todo el tiempo que permanece en vista.

ya que se precisa actualización más frecuente de los observables de fase de portadora para lograr precisiones altas, pero en cambio las observaciones de C/N_0 y pseudorango pueden actualizarse a menor tasa. El mensaje MSM 2, junto con el MSM 3 y MSM 4, forman el conjunto de mensajes utilizados en modos RTK convencionales. El mensaje MSM 5 permite almacenar información completa en el formato RINEX. Y los mensajes MSM 6 y MSM 7 extienden la resolución de los mensajes ya mencionados por lo que las aplicaciones son las mismas solo que a mayor precisión.

Empaquetado del pseudorango y fase de portadora

En la Fig. ?? se puede observar que existe una diferenciación entre los datos correspondientes a la parte satelital y otra correspondiente a la señal. En particular, la sección satelital contiene lo que corresponde a la parte gruesa del rango y es común a todas las señales de cada satélite. La sección de señal contiene la parte fina del rango y del rango basado en fase de portadora, esta es única por cada señal de cada satélite.

El chip tiene un periodo de $1/(1,023 MHz) = 977,5 ns \approx 1 \mu s$, y el rango grueso expresado en segundos tiene una resolución de $2^{-10} ms = 976,5 ns \approx 1 \mu s$. De esta manera vemos que la parte gruesa del rango (medición de pseudorango) se redondea a la distancia que viaja la señal en un tiempo de *chip*, es decir, tiene una resolución de aproximadamente 300 m en distancia. Esto se puede observar en color rojo en la Fig. 2.4. Ahora la parte que corresponde a cada señal, es decir, hay un valor por cada señal de la que se cuente con mediciones, es denominado rango fino. El mismo puede valer como máximo aproximadamente 1100 m en valor absoluto debido al rango del campo que contiene esta información. Pero como es una medida de lo que le falta al rango grueso para llegar al rango verdadero, si este campo supera el umbral de los 300 m ya mencionado, se le atribuye al rango grueso de manera que la parte fina vuelve a ser menor que 300 m.

La parte fina de fase de portadora se genera como un rango haciendo uso de mediciones de fase, al cual se le resta la parte gruesa del rango ya mencionada. Y a partir de aquí, se descarta el número entero de longitudes de onda que contiene la parte fina

(color rojo en Fig. 2.4), resultando en una parte fina que esta solo formada por una fracción de longitud de onda (color azul). La cantidad de longitudes de onda enteras descartadas se guarda para poder descartar la misma cantidad en la próxima época con mediciones, de manera que la parte fina de la fase de portadora comience a acumular a partir de aquí. Esto es equivalente a alinear la integración del corrimiento doppler de la portadora (medición de fase) con el pseudorango al inicio de la acumulación. Esto se mantiene así hasta que no haya un salto de ciclo en los lazos de seguimiento de la portadora o que el rango fino de fase exceda su rango máximo. En caso de suceder esto, se vuelve a alinear, es decir, se reinicia la cantidad de longitudes de onda enteras que se descarta en el rango fino formado como rango menos rango grueso.

Cabe destacar que como el rango grueso está simplemente redondeado y no truncado a longitudes de un chip, puede estar por encima o debajo del rango verdadero. Por lo que el campo de rango fino, de pseudorango y fase podría ser tanto positivo como negativo.

En el rover, qué recibe esta información, la manera de recuperar el rango completo de pseudorango es como la suma del rango grueso y del fino. Para fase de portadora, si queremos tener una alineación entre el pseudorango y el inicio de la generación, se puede sumar la parte fina con la parte gruesa, obteniendo un valor de ambigüedades dado. Pero si quisiéramos formar el rango completo con medición de fase directamente considerando que es igual a la parte fina, también es equivalente. Simplemente cambiaría el valor de las ambigüedades, que de hecho serían mucho mayores que en el caso de realizar la alineación. Esto no es un inconveniente ya que una vez resueltas estas ambigüedades solo queda fijar cuál es su valor y el rango obtenido con la medición tiene la precisión de las mediciones de fase.

2.5.4. Campos de los mensajes MSM

Todos los mensajes del tipo MSM tienen el mismo encabezado, que se puede observar en la Tab. 2.4. El mismo esta formado por los campos siguientes.

Número de mensaje Especificador de que mensaje se está enviando.

Identificador de la estación de referencia Número identificador que se le asignó a la estación de referencia. Para que el rover pueda identificar de qué base proviene el mensaje en caso de recibir mensajes de múltiples bases en simultaneo.

Tiempo de la época GNSS Tiempo correspondiente a la época de toma de mediciones. Cada sistema GNSS lo empaqueta de distinta manera. En particular GPS especifica el tiempo como la cantidad de milisegundos transcurridos desde el inicio de la semana GPS (medianoche del sábado por la noche o domingo por la mañana).

Indicador de múltiples mensajes MSM En alto si a continuación vendrán mensajes con mediciones para una misma época. En caso de que las mediciones fueron divididas en múltiples mensajes MSM, el rover deberá esperar a recibir el último mensaje para poder usar los datos que cada uno contiene.

Indicador de correcciones de reloj Este campo indica si se están realizando correcciones de reloj al tiempo de receptor de la base que está generando los mensajes. Si se indica que se están haciendo las correcciones, las mismas deben asegurar que el

CAMPO	Identificador de campo
Número de mensaje	DF002
Identificador de la estación de referencia	DF003
Tiempo de la época GNSS	Específico de cada sistema
Indicador de múltiples mensajes MSM	DF393
Reservado	DF409
Reservado	DF001
Indicador de correcciones de reloj	DF411
Indicador de reloj externo	DF412
Indicador de suavizado sin divergencia	DF417
Intervalo de suavizado	DF418
Máscara de satélites GNSS	DF394
Máscara de señales GNSS	DF395
Máscara de celdas GNSS	DF396

Tabla 2.4: Encabezado de los mensajes MSM.

reloj del receptor esté dentro de un rango de $\pm 1 \mu s$ de error. En caso de indicar que no hay correcciones esta condición es menos restrictiva y el rango aumenta a $\pm 1 ms$. También hay un estado que indica que no se conoce el estado de las correcciones, por lo que podrían estar haciéndose como no.

Indicador de reloj externo Este campo indica qué tipo de reloj está usando el receptor, un reloj interno o uno externo. Y si fuera externo además se puede indicar si esta enganchado o no, en caso de no estarlo podría haber fallas en este reloj y que la información no sea confiable.

Indicador de suavizado sin divergencia Este campo indica si se realiza un suavizado a las mediciones con un método sin divergencia (*DFS* por sus siglas en inglés), se realiza otro tipo de suavizado o ninguno.

Intervalo de suavizado Es el periodo de integración en el cual se están promediando las mediciones de pseudorange con información de la fase de portadora. En caso de no hacer ningún tipo de suavizado este campo se llena con ceros.

Máscara de satélites GNSS Este campo va a ser de utilidad para el software decodificador para saber de qué satélites se están enviando mediciones. Es un campo de 64 bits donde cada bit corresponde a un satélite, en GPS corresponden a cada PRN comenzando por el primer bit que equivale a PRN_1 . GPS tiene solo 32 satélites operativos por lo que se llenarán la primer mitad del campo con los satélites disponibles y la segunda mitad estará en cero siempre. En GLONASS ocurre lo mismo pero el primer bit corresponde al primer slot de frecuencia.

Máscara de señales GNSS Este campo será utilizado por el software decodificador para saber qué señales tienen mediciones disponibles en los mensajes enviados. Tiene 32 bits y se corresponden con los identificadores de señal del estándar RINEX

3.01. Entonces, si en las mediciones hay disponibilidad de una señal para al menos un satélite, el bit correspondiente a esta señal se encuentra en alto.

Máscara de celdas GNSS Este campo es de largo variable y condensa los últimos dos campos que se desarrollaron más arriba. Es una tabla de dos dimensiones que indica qué señal está disponible para cada satélite. Y es de largo variable ya que depende de la cantidad de señales y satélites disponibles, es decir, la cantidad de bits en alto en la máscara de señales y de satélites. El tamaño es $X = N_{sat}N_{sig}$, pero tiene una restricción a $X \leq 64$ por mensaje. En caso de superarse este número, hay que dividir los observables en distintos mensajes de manera que se cumpla con esta restricción. La primera fila de esta tabla corresponde a la señal con el identificador más chico (numéricamente), y así consecutivamente el resto de las filas. En las columnas sucede lo mismo pero con el identificador de satélites más chico.

Habiendo descrito el encabezado del mensaje se puede proceder a describir cada campo del contenido del mismo, que en parte ya se introduce en la Fig. ??.

Número entero de milisegundos en la parte gruesa del rango A partir del rango grueso definido en la Sección 2.5.3, se lo divide en una parte entera y fraccional (a milisegundos). La cantidad entera de milisegundos en el rango grueso está contenida en este campo.

Parte gruesa del rango módulo 1 ms En este campo va la parte fraccional en milisegundos que queda del rango grueso. En otras palabras sería el rango grueso menos el campo anterior.

Rangos finos de pseudorangos La parte fina del rango en base a mediciones de pseudorango que se definió en la Sección 2.5.3.

Rangos finos de fase de portadora La parte fina que obtenemos de las mediciones de fase de portadora, tal como se describió en la Sección 2.5.3.

Tiempo de enganche de fase de portadora Es un indicador del tiempo en el cual el receptor lleva enganchado de manera continua a una señal particular. Si ocurrió un salto de ciclo en el instante de toma de mediciones anterior, se debe reiniciar este campo a cero.

Indicador de ambigüedades de medio ciclo En caso de transmitir mediciones de fase de portadora con polaridad no resuelta es necesario setear este campo para que el software decodificador tenga esa información. Si el software decodificador no es capaz de trabajar con estas ambigüedades, va a descartar estas mediciones.

Relación portadora a densidad espectral de ruido Esta medición es un estimado de la relación C/N_0 (portadora a densidad espectral de ruido) para cada señal del satélite. Si se completa con ceros significa que la medición no es válida.

Hay campos tales como la desviación en frecuencia de la portadora que no son tratados con detalle ya que no se utilizan en este trabajo, pero tiene interés introducirlos para dar a entender la generalización que presentan los mensajes de múltiples señales. Lo mismo ocurre con el campo de información extendida de los satélites, que es un

campo que todavía no está implementado y se reserva para uso futuro.

Hasta aquí se desarrollaron los conceptos de posicionamiento relativo, o GNSS diferencial basado en fase de portadora. Este enfoque permite obtener soluciones de posición con una precisión en el orden de las decenas de centímetros o incluso centímetros. La ganancia es obtenida a costo de precisar trabajar no solo con un receptor GNSS, sino con varios, y no de manera aislada sino en conjunto. Para esto fue necesario presentar las distintas combinaciones que se pueden formar con las mediciones para desafectar errores y llegar a un escenario donde es factible resolver las ambigüedades que presentan las mediciones de fase. La complejidad que trae esto no es menor debido a que se precisa definir estándares de comunicación para los receptores operando en conjunto. Es por esto que se desarrollaron los puntos principales que sugiere el estándar RTCM para DGNSS, ahondando en los mensajes más importantes para conseguir el objetivo aquí planteado. Habiendo llegado hasta este punto resulta de interés poder validar lo desarrollado mediante ensayos con receptores GNSS operando en tiempo real. En el próximo capítulo se podrán observar resultados experimentales obtenidos en el laboratorio.

Anexo I

Cuando ponga los rangos de cada DF acordarme de agregar DF004 (gnss epoch time) del encabezad0.

ID	Nombre	Resolución	Rango
DF002		1	0 - 4095
DF003		1	0 - 4095
DF025 DF026 DF027		0.0001 m	$\pm 13.743.895,3471$ m

Tabla 2.5: Características de los campos del mensaje Tipo 1005.

Referencias

- [1] John G. Proakis, Masoud Salehi, “Digital Communications”, 5th ed., McGraw Hill.
- [2] Elliot D. Kaplan, Christopher J. Hegarty, “Understandign GPS: Principles and Applications”, 2nd ed., Artech House.
- [3] Peter J.G. Teunissen, Oliver Montenbruck, “Handbook of Global Navigation Satellite Systems”, Springer.
- [4] Mark L. Psiaki and S. Mohiuddin, “Modeling, Analysis, and Simulation of GPS Carrier Phase for Spacecraft Relative Navigation”, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 30, num. 6, 2007, pp. 1628-1639.
- [5] Garcia, Javier G. and Roncagliolo, Pedro A. and Muravchik, Carlos H., “A Bayesian Technique for Real and Integer Parameters Estimation in Linear Models and Its Application to GNSS High Precision Positioning”, *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 64, no. 4, 2016, pp. 923-933.
- [6] Cita del estándar RTCM v3.3.(me falta buscar bien como se cita un estándar).
- [7] Cita al estándar RINEX 3.05 (idem anterior).