



# Análisis de señales

## Proyecto de aula: Sistemas de localización (DRAFT)

Escuela de Ciencias exactas e Ingeniería

Código: SA2020I\_PROY01

**Profesor:** Marco Teran

**Deadline:** G01- 12 de marzo de 2020

G02- 12 de marzo de 2020

### Resumen

En este documento se exponen los distintos proyectos de corte con un alto contenido de investigación. En la primera parte del documento se introduce a los sistemas de localización para entornos exteriores e interiores, la navegación por satélite y sus principios de funcionamiento. Se realiza brevemente una descripción acerca del proceso de adquisición de señales de sistemas de navegación global por satélite (GNSS, *ing.* Global Navigation Satellite System) mediante la implementación de la transformada rápida de Fourier (FFT, *ing.* Fast Fourier Transform). También se describen los distintos métodos existentes para la estimación de los parámetros de radionavegación de la señal, para luego exponer la etapa de calculo de coordenadas, que es el objetivo final de los sistemas de radionavegación. Al final del documento se especifica el proyecto propuesto para trabajo de investigación en el aula.

### Keywords:

*Microlocation, Indoor location, WSN, Sensor Fusion, RSSI, Machine Learning, Radionavigation, GNSS, GPS, RINEX, BLE, Wi-Fi, UWB*

## 1. Objetivo

Realizar un trabajo de investigación cuyo tema principal sea el análisis e implementación de señales a partir de distintos tipos sensores y de Sistemas globales de navegación por satélite, mediante un estudio del estado del arte, realización de modelos y simulaciones. Desarrollo de un marco de referencia para la adquisición de señales que permitan realizar tareas de localización y microlocalización de objetos móviles en entornos interiores y exteriores utilizando redes de señales inalámbricas y unidades de medición inercial.

## 2. Sistemas de localización

Hoy en día, gracias a la evolución de la computación ubicua, el aumento de la capacidad de procesamiento de los sistemas integrados, los avances en las nuevas redes de telecomunicaciones inalámbricas, y la popularidad de los dispositivos móviles, se han desarrollado nuevas aplicaciones y capacidades nunca antes vistas [1, 2]. La tarea del posicionamiento y la navegación ha sido una de las principales preocupaciones de la humanidad desde sus inicios. El posicionamiento es el proceso en el que se determinan la posición y orientación y las derivaciones de estos parámetros de un objeto, fijo o móvil. A su vez, la tecnología de microlocalización ha despertado interés en los investigadores y desarrolladores en los últimos años. Actualmente, los métodos de posicionamiento y las tecnologías utilizadas para realizar la localización en entornos exteriores han demostrado suficiente precisión, aunque todavía existen limitaciones de precisión [?]. El proceso de localización de un objeto con alta precisión se conoce como microlocalización. Por ejemplo, en entornos interiores, regularmente una precisión de un centímetro necesariamente busca proporcionar suficiente precisión. Esta necesidad ha dado lugar a un nuevo conjunto de metodologías y mecanismos de localización. La microlocalización se implementa en tareas y actividades que implican la identificación de un objeto y el seguimiento de su posición en tiempo real con alta precisión, tales como logística y gestión minorista, sistemas inteligentes y navegación autónoma, servicios de salud, y desarrollos urbanos inteligentes [3].

Los avances en capacidades de hardware y comunicaciones inalámbricas, han permitido el desarrollo de servicios basados en localización (LBS). Estos servicios son aplicaciones que operan dependiendo de la ubicación del usuario. La demanda de aplicaciones que utilizan LBS ha aumentado en los últimos años en el

sector logístico, tales como seguimiento de bienes y paquetes, transporte inteligente, tecnologías robóticas móviles, *wearables*, ciudades inteligentes, seguridad y soluciones sanitarias para ayudar a personas con movilidad limitada. Hay un mercado creciente de sistemas que permiten la navegación en entornos exteriores e interiores. Se estima que para 2022, el 65 % de las empresas necesitarán utilizar servicios basados en la ubicación para entornos interiores [4]. Lo que la convierte en una de las mejores tecnologías para el año 2020 por unos 10 mil millones de dólares. Además, ha disminuido el costo de los sensores inteligentes y el despliegue de la red de sensores inalámbricos. Otra ventaja es el bajo consumo de energía relacionado con estas tecnologías [5].

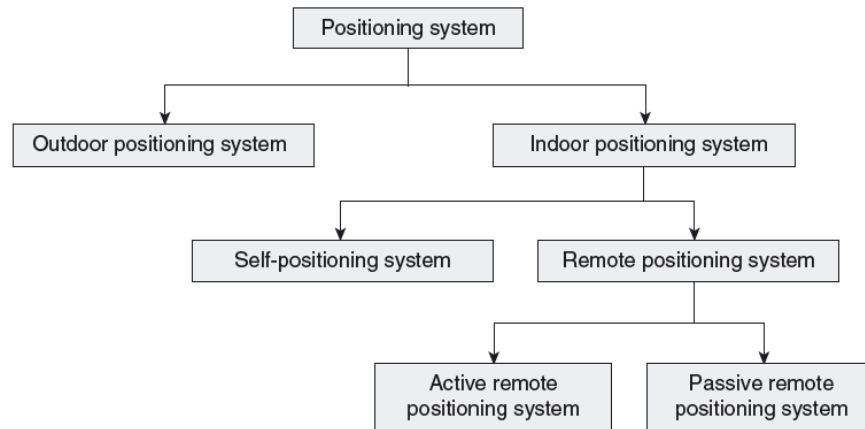
La aparición de los Sistemas Mundiales de Navegación por Satélite (GNSS) permitió un desarrollo significativo en el ámbito de la determinación de la posición y la navegación, permitiendo que cualquier dispositivo con capacidad GNSS conozca sus coordenadas de posición en cualquier parte del mundo. El problema con los GNSS es que son bastante sensibles al efecto *multipath* y la interferencia. Estas cuestiones conducen a una baja precisión y un rendimiento considerablemente bajo en entornos interiores y cañones urbanos [6]. El desarrollo de nuevos sistemas de posicionamiento en entornos interiores tiene requisitos especiales de precisión porque son de menor escala, y tienen geometrías y estructuras variables más complicadas que los entornos exteriores. Sin embargo, para mejorar la precisión, el estudio de técnicas y nuevos sistemas de localización y posicionamiento en entornos interiores utilizando sensores no intrusivos, utilizando otros tipos de señales inalámbricas disponibles, como la tecnología Bluetooth, GSM, Wi-Fi, etc., se ha convertido en una línea de investigación y desarrollo tecnológico que atrae un interés creciente [7, 8, 9]. Hoy en día, la mayoría de los LBS obtienen su posición de los sensores GNSS en aplicaciones al aire libre. Sin embargo, los sistemas de posicionamiento en interiores que utilizan señales inalámbricas han atraído un interés considerable recientemente y se espera que sigan creciendo. Además, se ha demostrado que la fusión y la integración con diferentes sensores adicionales, mejorar la calidad de la estimación de la posición [10, 11].

La microlocalización es el proceso utilizado para determinar la ubicación de una posición de un objeto con alta precisión, en relación con otras posiciones definidas, y tiene un papel importante en muchas aplicaciones. El rápido desarrollo de los sistemas móviles y la disponibilidad de información geográfica han permitido el crecimiento y la popularización de los LBS. Sin embargo, una alta resolución durante la ubicación permite mejorar la capacidad de muchas aplicaciones y requisitos; también ofrece varios beneficios adicionales a las tareas. Existen diferentes tipos de tecnologías y métodos que permiten tareas de microlocalización. Los sistemas mundiales de navegación por satélite (GNSS) han estado presentes durante muchos años en entornos al aire libre [12]. Sin embargo, es posible mejorar la precisión, mediante la integración de información externa en el proceso de cálculo utilizando correcciones con sistemas de aumento, como GPS asistido (A-GPS), fusión sensorial con unidades de medición inercial (IMU), como (GPS-INS), y utilizando estaciones de referencia adicionales para proporcionar correcciones en tiempo real, como la RTK (Real Time Kinematic), del inglés navegación cinética satelital en tiempo real. Sin embargo, también existen LBS para entornos interiores, donde los sistemas de navegación basados en GNSS no funcionan adecuadamente. En los entornos interiores, el GNSS no funciona adecuadamente y pierde utilidad. Actualmente, hay muchas soluciones y tecnologías disponibles para proporcionar posicionamiento en interiores con una precisión suficiente, como el Bluetooth Low Energy (BLE), Wireless Fidelity (Wi-Fi), identificación por radio-frecuencia (RFID), tecnología Ultra-Wideband (UWB), etc. Algunas soluciones utilizan sensores y balizas que deben ser desplegados en el edificio, afectando la infraestructura y aumentando los costos de implementación. Aunque muchas instalaciones cuentan con Wi-Fi público desplegado, a diferencia de las tecnologías BLE y UWB.

## 2.1. Wireless Positioning Systems

*Radio-location* es el proceso en el que las señales inalámbricas, es decir, radio inalámbrica, se utilizan para la tarea de posicionamiento. Un sistema de posicionamiento que utiliza radiolocalización se llama Sistema de Posicionamiento Inalámbrico (WPS). Este tipo de sistemas se compone básicamente de dos estructuras de hardware, transmisores (TX) y receptores (RX), que cumple generalmente la función de la unidad de medida. Los sistemas de posicionamiento se clasifican según cuál de estos dos componentes del hardware realiza la estimación de posición, y quién explota esta información de posicionamiento.

- Con arreglo a este criterio, los WPS se clasifican en sistemas de posicionamiento automático, posicionamiento indirecto y sistemas de posicionamiento indirecto (Figure 1).



**Figura 1** – Clasificación de los sistemas de posicionamiento. Adapted from from [13].

Hoy la localización es un problema al que ya se le ha venido dando solución. Pues, existen sistemas de posicionamiento en entornos exteriores que utilizan tecnologías inalámbricas diseñadas especialmente para esta aplicación tales como el GPS, Galileo, GLONASS, en los cuales no importa la estructura física del entorno. Por otro lado, en entornos interiores no se han desarrollado sistemas en los que no importe la estructura física del entorno y las tecnologías desarrolladas para este tipo de escenarios aún no han tenido gran impacto en el mercado.

Surge así una nueva necesidad de sistemas de posicionamiento, mediante el uso de tecnologías que se desarrollaron con un objetivo diferente al de localizar que ya están implementadas en lugares y dispositivos, tales como las redes móviles, el Wi-Fi, Bluetooth, entre otras, que, en cuanto a localización se refiere, aportan información relevante. GPS, Galileo y GLONASS son sistemas de posicionamiento global mediante satélites caracterizados por la alta confiabilidad y precisión que ofrecen al utilizarse en entornos exteriores, pero no son muy eficientes a la hora de utilizarse en entornos interiores debido a los fenómenos (reflexión, refracción, difracción, y absorción, entre otros) a los que están expuestas las ondas de radiofrecuencia en estos escenarios y la imposibilidad de éstas de penetrar edificios y en general construcciones. Es importante resaltar que estos sistemas fueron inicialmente planeados para funcionar con línea de vista (nada en medio) desde el dispositivo que se utiliza para localizar, hasta los satélites que realizan la triangulación, es por esto por lo que, al encontrarse el dispositivo dentro de una edificación crea un “obstáculo” el cual anula el correcto funcionamiento del sistema, debido al debilitamiento de la señal en el recorrido.

### 2.1.1. Clasificación de Sistemas de Posicionamiento Basados en Tecnologías Implementadas

Las tecnologías de localización se pueden clasificar en dos categorías según sus requisitos *hardware* y aquellos que utilizan material *comercial*, como teléfonos celulares, que tienen radios (Wi-Fi, Bluetooth, FM, etc.) y sensores inerciales (giroscopios, acelerómetros, magnetómetros), y los que utilizan el hardware *exclusivamente* diseñado para la localización, como UWB y las tecnologías de ultrasonido. Es posible clasificar las tecnologías de posicionamiento inalámbrico de acuerdo con el tipo de características radioeléctricas y parámetros de radio, que se miden a partir de la señal, por ejemplo, el tiempo de vuelo (TOF), otras características espaciales, como el ángulo de llegada, y también mediciones energéticas de la señal recibida.

En Figure 2 se muestran diferentes tecnologías inalámbricas, su precisión, y la gama de diversas aplicaciones de posicionamiento. Las tecnologías inalámbricas implementadas se refieren a la capa física de los sensores y su infraestructura.

## 2.2. Sistemas Globales de Navegación por satélite

Los sistemas GNSS tienen una amplia gama de aplicaciones, quizás la mas común sea el determinar la posición de un objeto, también se utiliza para encontrar, predecir y modificar la trayectoria de objetos en movimiento, modificando los parámetros de control de estos, brindándoles mayor autonomía. Cabe destacar

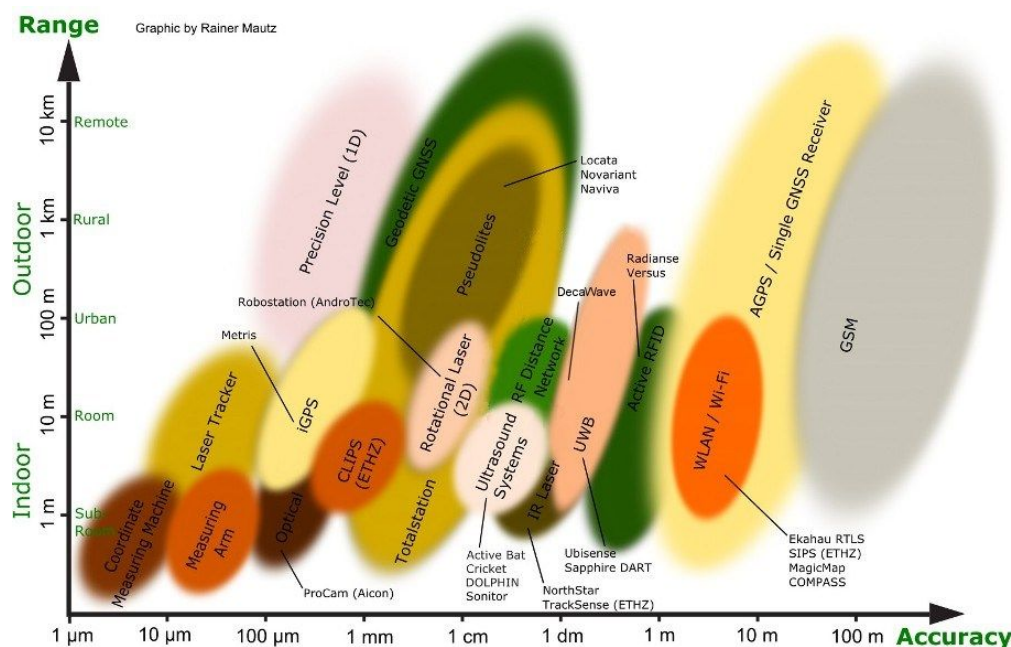


Figura 2 – Tecnologías de posicionamiento inalámbrico. Adapted from from [14].

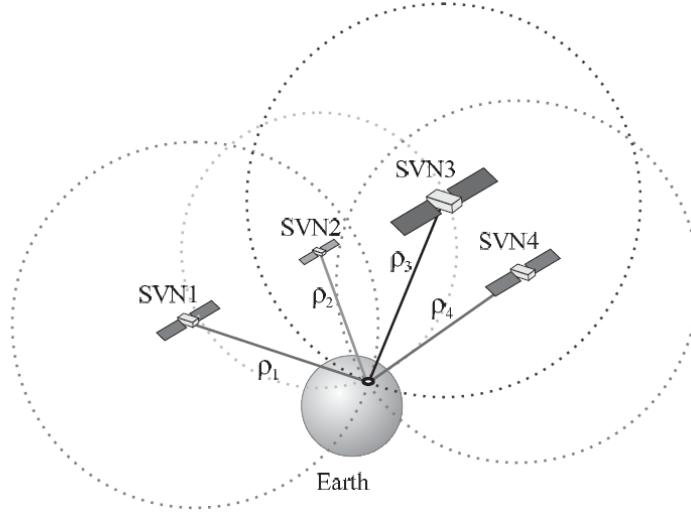
que la topografía y la geodesia últimamente utilizan los sistemas GNSS como fuentes de información relevante. La radionavegación por satélite abrió la posibilidad de utilizar satélites artificiales terrestres como puntos de referencia de radionavegación. Con ayuda de los satélites es posible determinar la posición, la velocidad y el tiempo preciso de vehículos aéreos, náuticos y otros tipos de usuarios con gran precisión en todo el globo terráqueo. El GNSS hace referencia a una constelación de satélites que proporciona señales desde el espacio, transmitiendo datos de posicionamiento y temporización a sus receptores. Luego de desarrollado el primer sistema de navegación por satélite, el GPS, por parte de EE. UU, todos los países comenzaron a usarlo. Tiempo después, se dieron cuenta que en cualquier momento si EE.UU tuviera el capricho de cortar el servicio de este sistema para lugares ubicados fuera de sus fronteras, pues lo hacían y ya. Esta dependencia llevo a cabo el desarrollo de propios sistemas de navegación por parte de las potencias en tecnología y fue como nacieron sistemas como el Galileo de Europa, el GLONASS de Rusia, BeiDou de China y el indio IRNSS, entre otros.

El observable básico para el calculo del vector de estados (las coordenadas espaciales, la corrección temporal de la escala de tiempos y el vector de velocidades) es la medición del tiempo propagación (pseudoretardo) de la señal de radio-navegación entre los satélites del sistema y el receptor usuario (ver figura 3 en la página siguiente). La distancia entre ellos (pseudodistancia) es el producto de la velocidad de propagación de la señal (velocidad de la luz) y el pseudoretardo. Este método se conoce como método telemétrico, y para la medición indirecta de las distancias mediante el calculo del pseudoretardo se hace necesaria la implementación de señales con propiedades particulares. Para la evaluación de los parámetros de navegación con alta precisión es necesario que dentro de las característica de las señales de radio-navegación se incluya una alta inmunidad al ruido e interferencias, ya que la señal se propaga aproximadamente 20000 km, desde la órbita MEO donde se encuentran los satélites GNSS. Estas señales deben brindar una alta precisión de medida del tiempo de llegada (pseudodistancia) y corrimiento Doppler de la frecuencia. Además deberán contar con una probabilidad alta de correcta decodificación del mensaje de navegación.

Para evaluar el rendimiento de un sistema de navegación satelital se evalúan cuatro criterios:

**Precisión:** la diferencia entre la posición, velocidad o el tiempo medidos y el real de un receptor.

**Integridad:** capacidad del sistema para proporcionar un umbral de confianza o en caso de anomalía en los datos, una alarma.



**Figura 3** – Principio básico de posicionamiento GNSS. Se pueden calcular la posición del usuario si se conoce la posición de cuatro satélites  $SV_i$  y el tiempo que viajan las señales las distancias  $\rho_i$ . Tomado de [15].

**Continuidad:** capacidad del sistema de funcionar sin interrupción.

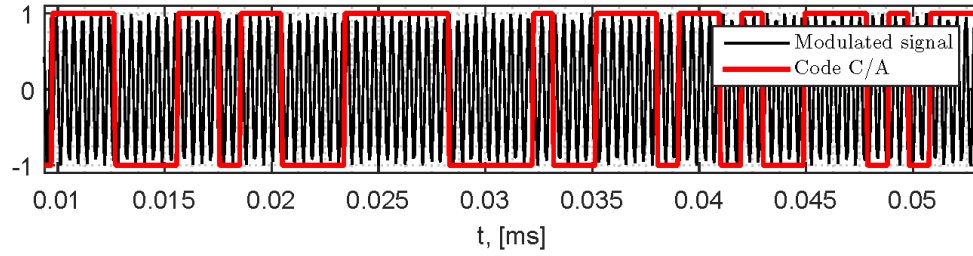
**Disponibilidad:** porcentaje de tiempo en que una señal cumple los criterios de precisión, integridad y continuidad anteriormente mencionados.

### 2.2.1. Características de la señal de radionavegación

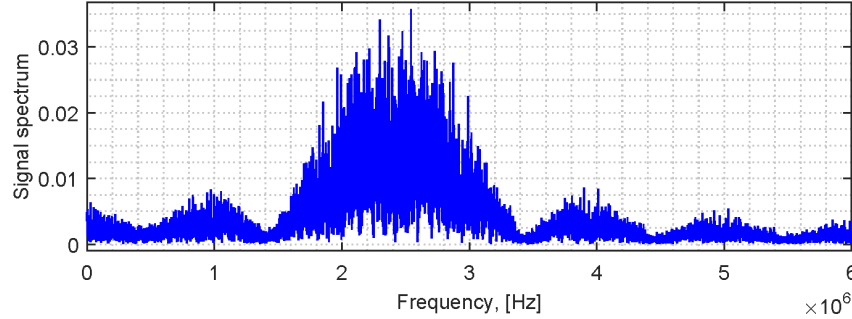
Con el fin de resolver la tarea de navegación basada en posicionamiento, velocidad y tiempo (PVT), así como la planificación de las sesiones de navegación y observación, es indispensable una correcta medición de los parámetros de radionavegación de la señal GNSS y la correcta decodificación del mensaje de navegación que porta esta última. Las señales de navegación deben presentar ciertas características y una estructura concreta, con miras de evaluar con precisión sus parámetros de radionavegación y poder ser multiplexadas y procesadas en el dispositivo receptor. En los GNSS se utilizan señales de espectro ensanchado, en las cuales para el ensanche del espectro (con el fin de garantizar los requisitos de exactitud en la medición de los parámetros de radionavegación) se utiliza la manipulación por desplazamiento de fase de la señal por los símbolos de una secuencia de código binario PRN (pseudo-random noise). En la salida del RF Front-end de un receptor GNSS se tiene una señal GNSS con fase aleatoria en un fondo de ruido blanco gaussiano aditivo (WAGN). La señal GNSS en la salida del RF Front-end se puede expresar mediante la siguiente forma 1,

$$y(t, \lambda) = \sqrt{2P} h_{NM}(t - t_{rec}) h_{PRN}(t - t_{rec}) \cos(2\pi(f_{IF} + f_d)t + \varphi_0) + \eta(t), \quad (1)$$

donde,  $\lambda = [t_{rec}, f_d, \varphi_0]$  – vector de parámetros de radionavegación de la señal;  
 $t_{rec}$  – tiempo de retardo;  
 $f_d$  – corrimiento Doppler de frecuencia;  
 $f_{IF}$  – frecuencia intermedia;  
 $P$  – potencia de la señal;  
 $h_{PRN}$  – función de código PRN;  
 $h_{NM}$  – función envolvente del mensaje de navegación;  
 $\varphi$  – fase inicial de la señal de radionavegación recibida;  
 $\eta(t)$  – AWGN con media cero.



**Figura 4** – Osciloscopio de la señal GNSS con modulación PSK.



**Figura 5** – Espectro de la señal GNSS con modulación PSK.

La función de correlación del AWGN es del tipo

$$R_{\eta}(\tau) = \frac{N_0}{2} \delta(\tau),$$

donde,  $\delta(\tau)$  – función delta-Dirac;  
 $\frac{N_0}{2}$  – densidad espectral de potencia bilateral del ruido.

En la figura 4 se puede apreciar el código que modula la portadora para una señal GNSS que utiliza como técnica de modulación la PSK (Modulación por llaveo de fase, *ing.* Phase Shift Keying). En la gráfica 5 se puede observar su forma espectral calculada mediante la implementación de la transformada rápida de Fourier (FFT), donde es apreciable la frecuencia central correspondiente a la intermedia y un ancho de banda igual a dos veces el inverso de tiempo de duración de bit (1,23 MHz).

Las señales de radionavegación de espectro ensanchado presentan una función de correlación con picos principales estrechos, esta característica garantiza una alta resolución en las distancias. Ya que la decisión de método de la señal de navegación se lleva a cabo sobre la base del establecimiento del pico principal de la integral de correlación entre la señal recibida y una señal de referencia generada en el receptor de acuerdo a determinado criterio [16].

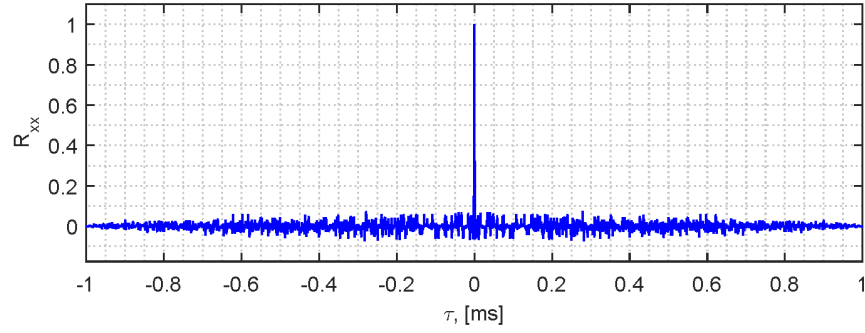
En la gráfica 6 en la página siguiente se puede apreciar la función de autocorrelación del código Gold utilizado para el SV (Vehículo espacial, *ing.* Space vehicle) de PRN 2.

En la gráfica 7 en la página siguiente se puede observar la misma función aumentada en su lugar de origen  $\tau = 0$ , en la cual se puede distinguir el pico de correlación máxima, su ancho que determina la precisión en la determinación del tiempo de retardo y su relación a los picos secundarios.

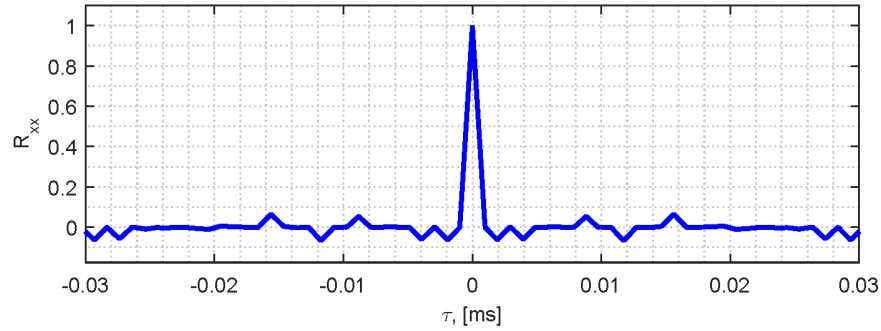
### 2.2.2. Adquisición

La resolución de la tarea de navegación basado en posicionamiento, velocidad y tiempo (PVT), el cálculo del vector de estado del receptor, comienza con la búsqueda de las señales de navegación de los distintos





**Figura 6** – Función de autocorrelación del código PRN Gold normalizada.



**Figura 7** – Función de autocorrelación del código PRN Gold normalizada y aumentada.

satélites en un espacio de parámetros de radionavegación desconocidos  $\lambda = [t_{rec}, f_d]$ .

La principal tarea realizada durante la detección de una señal es la estimación del tiempo de retardo  $t_{rec}$  de la misma y el corrimiento Doppler de la frecuencia  $f_d$ . El estimado de la fase inicial y la amplitud misma de la señal se pueden desestimar, ya que estos parámetros no presentan ningún tipo de información durante la toma de decisión sobre la detección de la señal de radionavegación [17].

Tal cual como se había expresado, en el lazo de recepción del usuario, la señal de radionavegación recibida GNSS se define como una señal con fase aleatoria en un fondo de ruido blanco aditivo gaussiano (AWGN).

Tradicionalmente el proceso de búsqueda y detección de la señal se realiza mediante procesos de correlación en el dispositivo receptor. Para ejecutar el procesamiento de correlación de la señal de radionavegación recibida en el trazo de recepción se puede utilizar un detector de fase (PD, *ing.* Phase detector), el cual y casi por regla se realiza bajo del principio de procesamiento de correlación en cuadratura de IQ, mediante la correlación de la señal recibida con una copia local compleja de referencia  $\dot{s}_{LO}(t, \tilde{\lambda})$ . La copia de la señal local compleja,  $\dot{s}_{LO}$ , formada localmente en el aparato receptor presenta la siguiente forma

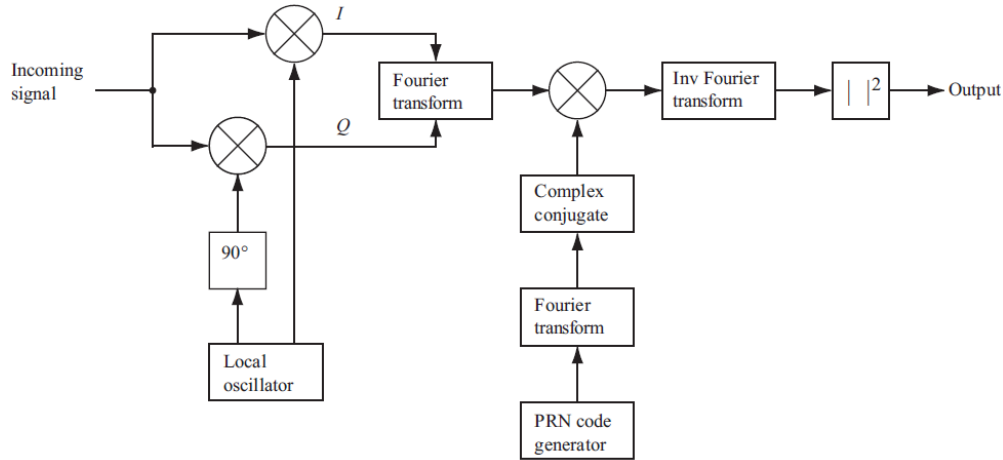
$$\dot{s}_{LO}(t, \tilde{\lambda}) = h_{PRN}^X(t - \tilde{t}_{rec}) e^{i(2\pi(f_{IF} + \tilde{f}_d)t)}, \quad (2)$$

donde,  $h_{PRN}^X(t - \tilde{t}_{rec})$  – unción de amplitud modulada de referencia para un código de pseudo-distancia (*ing.* ranging code) de tipo  $X$ ;

$\tilde{\lambda} = [\tilde{t}_{rec}, \tilde{f}_d]$  – vector de estimaciones de los parámetros de radionavegación de la señal recibida;

$\tilde{t}_{rec}$  – estimación del retardo del código de pseudodistancia;

$\tilde{f}_d$  – estimación del corrimiento Doppler de la frecuencia portadora de la señal de radionavegación recibida.



**Figura 8** – Diagrama estructural del esquema de búsqueda utilizando el método de detección de la transformada rápida de Fourier (FFT). Tomado de [15].

En la práctica la señal local de referencia puede no ser totalmente idéntica a la señal recibida. Por consiguiente, la expresión IQ en la salida del correlador de tipo cuadratura se puede definir bajo la forma de integral de correlación siguiente

$$\dot{z}(\lambda, \tilde{\lambda}) = \int_0^{T_N} y(t, \lambda) \dot{s}_{LO}(t, \tilde{\lambda}) dx, \quad (3)$$

donde,  $\dot{z}$  — Función estadística de decisión (resultado de correlación);  
 $T_N$  — intervalo de acumulación (integración) de la señal de radionavegación, el cual a su vez generalmente es igual a la duración de un periodo del código de pseudodistancia.

El método de detección está basado en la realización de la correlación de la señal de entrada de radionavegación con la serie del código de interés. Este procedimiento es posible gracias a las propiedades de ortogonalidad entre los códigos de los distintos satélites [18].

En la gráfica 8 se muestra el diagrama estructural del método de detección implementando la transformada rápida de Fourier [19].

A continuación se presenta el resultado del cálculo de la estadística de decisión *dotz* con el registro real de una realización de la señal GPS (ver gráfica 9 en la página siguiente).

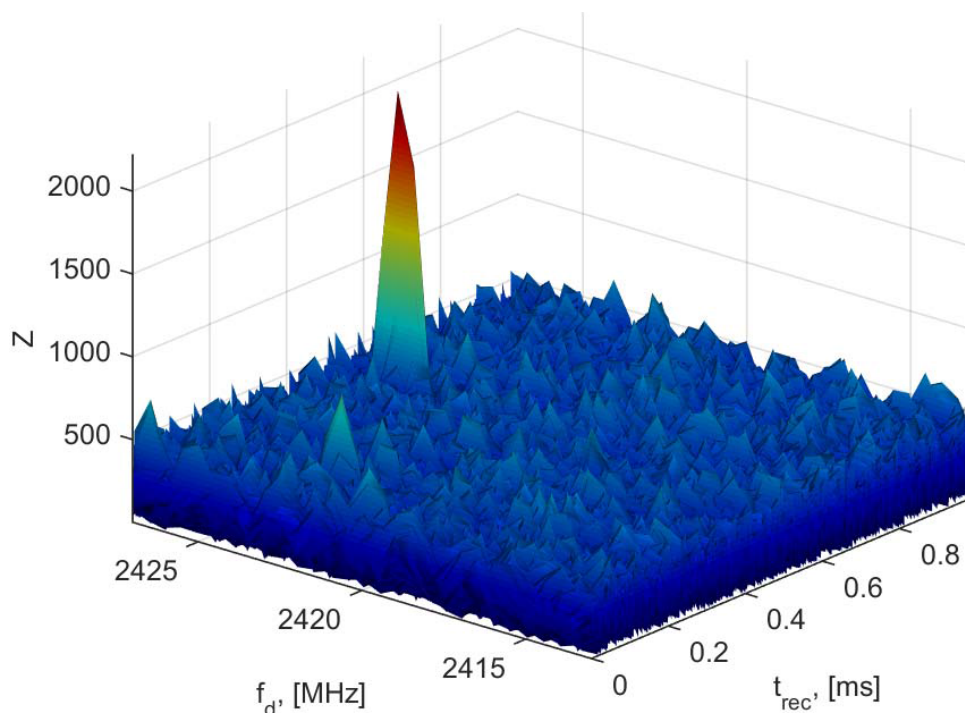
En la gráfica 9 en la página siguiente el máximo de la función estadística de decisión se puede identificar fácilmente a simple vista, también se puede observar que los lóbulos laterales, cuyos valores dependen en gran medida del nivel de ruido [15].

### 2.2.3. Seguimiento de parámetros de Navegación, Tracking

El seguimiento a la señal recibida es una de las principales operaciones que se llevan a cabo en cualquier receptor de radionavegación para la solución de la tarea PVT. Debido al constante movimiento del dispositivo receptor y los satélites, el retardo y corrimiento Doppler de frecuencia cambian constantemente. Como resultado, el problema de formar estimaciones precisas de los parámetros de radionavegación de la señal, y en consecuencia del vector del estado del receptor del usuario, se resuelve con la ayuda de métodos basados en la teoría de filtrado óptimo de procesos estocásticos.

De la calidad de la realización del proceso de seguimiento de los parámetros de navegación depende directamente la precisión de la medición de las coordenadas. El objetivo principal del sistema de seguimiento





**Figura 9** – Estadística de decisión del registro real de una realización de la señal GPS L1 mediante la implementación del método de detección FFT en presencia del satélite PRN 4.

es el llevar al error entre la señal recibida y la local de referencia a cero. Durante este proceso se obtiene información más precisa acerca de los parámetros de radionavegación de la señal. Se realizan los filtros PLL (doppler frequency tracking) y DLL (Code Tracking) mediante la implementación de discriminadores.

#### 2.2.4. Cálculo de coordenadas

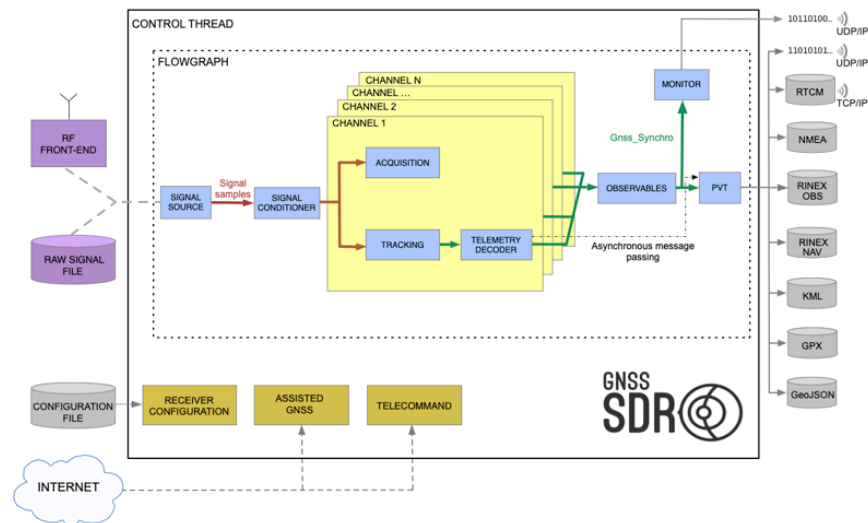
La principal tarea PVT consiste en el cálculo del vector de estado del receptor, en otras palabras la obtención de la ubicación del receptor (sus coordenadas). Existen una serie de métodos para la solución de esta tarea, entre los métodos mas utilizados se encuentra el método de las pseudodistancias. El cálculo del vector de estados en el receptor se basa en la medida de las distancias del receptor a cada uno de los satélites visibles (no menos de 4), para después calcular sus coordenadas.

#### 2.2.5. GNSS Software Defined Radio

Radio definida por software se refiere a sistemas en los que los componentes que se han implementado típicamente en hardware (p.ej. mezcladores, filtros, demoduladores, detectores, etc.) se implementan mediante software ejecutándose en un ordenador personal o sistema embebido. La tecnología actual todavía no permite procesar señales digitalmente a las frecuencias que transmiten los satélites (alrededor de 1,5 Ghz, más detalles en el tutorial de señales GNSS), así que todavía necesitamos una interfaz de radiofrecuencia que convierta las señales a una frecuencia más baja, hacer algo de filtrado y amplificación en el proceso, y muestrearlos a un cierto ritmo, entregando una corriente de muestras crudas digitales cuantificadas a la plataforma de computación (vía USB, Ethernet, etc.).

A continuación, el GNSS-SDR se encarga del procesamiento de todas las señales digitales, la adquisición de señales y el seguimiento de las señales de satélite disponibles, la decodificación del mensaje de navegación y el cálculo de los elementos observables necesarios mediante algoritmos de posicionamiento, que finalmente computan la solución de navegación. El software está diseñado para facilitar la inclusión de nuevas técnicas de procesamiento de señales, ofreciendo una manera fácil de medir su impacto en el rendimiento general del

receptor. La prueba de todos los procesos se lleva a cabo tanto mediante la validación funcional sistemática de cada bloque de software como mediante la validación experimental del receptor completo utilizando cualquiera de las señales en tiempo real recibidas por el frente de radiofrecuencia o un archivo que contenga esas muestras de señal crudas.



**Figura 10** – Diagrama general de bloques de una solución de GNSS SDR. Adapted from from [13].

Todas las señales intermedias son observables, y los productos del procesamiento de señales del GNSS (es decir, las mediciones conocidas en este contexto como observables y los datos transmitidos por los satélites en su mensaje de navegación) se entregan en formatos estándar.

## 2.3. Localización en entornos interiores

Por otro lado la microlocalización, también conocida como localización en interiores aun se considera que esta en etapa temprana de desarrollo. Con tantos avances en la geo-localización es difícil creer que el tema de localización en interiores no haya sido abordado. Se han desarrollado investigaciones exhaustivas durante años, sin embargo aun no se ha estandarizado un método para hacerlo. Para poder encontrar la posición de alguien en un espacio cerrado, se necesita un punto de referencia. Es imposible recibir señales GPS en un espacio cerrado. Esto quiere decir que es necesario recurrir a nuevas tecnologías para este propósito. Para este propósito normalmente se hace uso de señales de radio, infrarrojo, ultrasonido o campos magnéticos para transmitir información. Una vez recolectada, esta información puede ser interpretada para ser usada en algoritmos de posicionamiento, otorgando distintos niveles de precisión. Existen métodos de posicionamiento bastante precisos que hacen uso campos magnéticos, pero que su implementación es compleja y costosa. Además de que no son una tecnología a de fácil acceso. Por otro lado, se puede hacer uso de señales de radio, como aquellas emitidas por los puntos de acceso (Access Points) de Wi-Fi y dispositivos Bluetooth, que son comunes y de fácil acceso para este propósito. Es importante entender esta tecnología a para el desarrollo de los proyectos.

### 2.3.1. Tecnologías utilizadas para la navegación en entornos interiores

Wi-Fi es una tecnología inalámbrica que permite a los usuarios conectarse a una red haciendo uso de dispositivos conocidos como Access Points. Opera principalmente sobre las bandas de frecuencia de  $2,4\text{ GHz}$  y  $5\text{ GHz}$ , también conocida como la bandas científicas, industriales y medicas (ISM) y ha sido estandarizado por el instituto de ingenieros eléctricos y electrónicos (IEEE) como 802.11.

Es una tecnología ampliamente usada a nivel mundial. Wi-Fi es una marca de la Alianza Wi-Fi, que adopta, prueba y certifica que los equipos cumplen con los estándares 802.11 relacionados con redes WLAN,

el objetivo principal de esta marca es conectar a todo el mundo en todas partes, ya que esto trae mejoras en los aspectos de la vida cotidiana. La disponibilidad de esta tecnología en lugares es muy alta y se caracteriza por tener un alcance aproximado de 20-30 metros. En teoría, el Wi-Fi tiene la capacidad de operar en 14 canales diferentes, con  $20\text{ MHz}$  o  $22\text{ MHz}$  de ancho, tal como se observa en la Figure 11. Es importante resaltar que, si el punto de acceso es el canal 1, la señal se extiende hasta el canal 3, es decir, por tanto, la señal se transmite a través de 3 canales (canales 1, 2 y 3). Por otro lado, si el punto de acceso es el canal 6, la señal se transmite a través de 4 canales (canales 4, 5, 6, 7 y 8). Y finalmente, cuando se está en el canal 11, la señal va desde el canal 9 al 13.

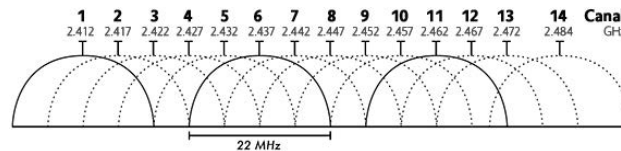


Figura 11 – Frecuencias y canales Wi-Fi. Adapted from from [13].

Bluetooth es una tecnología de comunicación inalámbrica que permite que dispositivos electrónicos se comuniquen en distancias cortas, al igual que WiFi, opera en la banda de frecuencia de los  $2,4\text{ GHz}$  (ISM). A pesar de operar en una banda abierta, la tecnología a Bluetooth es regulada por el SIG (grupo de interés especial de Bluetooth) y fue estandarizado por la IEEE como 802.15.1. Ejemplos comunes de dispositivos que hacen uso de Bluetooth son auriculares, *joysticks*, teclados y ratones inalámbricos, etc.

El BLE una de las tecnologías inalámbricas más recientes, siendo una derivación del Bluetooth, pero con el objetivo de trabajar con menor costo energético. Se denominaba Wibree antes del año 2007 y se le conoce a *Nokia* como su desarrollador. La disponibilidad de esta tecnología en lugares es alta y se caracteriza por tener un alcance aproximado de 50 metros. La aplicación principal de esta tecnología es enviar mensajes por medio de una aplicación hacia los celulares de los visitantes de tiendas de ropa, accesorios o museos, enviando la descripción de la pieza al dispositivo. Aunque de igual manera, se le ha usado en los últimos años en el campo de la microlocalización. Como se observa en la Figure 12, el Bluetooth está compuesto por 40 canales, cada uno con  $2\text{ MHz}$  de ancho, 37 de estos se utilizan para el envío de datos y 3 para envío de paquetes publicitarios. Esta tecnología se caracteriza por tener una velocidad de envío de datos de  $1\text{ Mbit/s}$ .

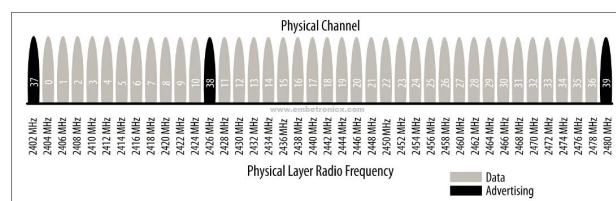


Figura 12 – Frecuencias y canales BLE. Adapted from from [13].

### 2.3.2. Métodos de localización en interiores

Las señales de radio emitidas por dispositivos inalámbricos tienen distintos usos que dependen del método de posicionamiento que desee ser implementado. Durante los últimos años muchos de estos métodos han sido implementados, los mas comunes son la triangulación, la proximidad y el *fingerprinting* (análisis de escenario). Es importante comprender los parámetros a ser evaluados sobre la señal que va a ser usada como punto de referencia. También conocido como *fingerprinting*. Es en donde previamente se recolecta información radioeléctrica de las señales inalámbricas del lugar deseado, teniendo una base de datos la cual permitirá relacionar las lecturas del sistema en tiempo real con las que se tenían anteriormente y así estimar la posición. Esta técnica se suele usar con el indicador de intensidad de señal recibida (RSSI, *ing.* Received Signal Strength Indicator).

### 3. Proyecto RINEX GLONASS

#### Descripción del proyecto

Como resultado final del *proyecto de investigación en el aula* será desarrollado un *algoritmo* en *Matlab* que realice cálculos de coordenadas mediante la utilización de archivos **RINEX** como datos entrada. El algoritmo de *Matlab* debe ser capaz de extraer toda la información de *observables* y *mensaje de navegación* disponible en el archivo **RINEX 3.0**. Este algoritmo debe ser genérico y a prueba de errores, ya que es necesario que pueda abrir y extraer la información de cualquier otro tipo de archivo **RINEX 3.0** y realizar el cálculo de coordenadas. Se deberá presentar un informe completo de acuerdo al formato de trabajos L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X, adjuntando a su vez los códigos utilizados para su desarrollo, tanto *.tex*, como los *scripts* de *Matlab*. El código debe ser genérico y con comentarios, y se deben adjuntar los archivos **RINEX** utilizados.

#### Objetivo:

Desarrollar un *algoritmo* que determine la **solución de navegación y tiempo (cálculo de posición)** del sistema **GNSS GLONASS**, mediante la implementación de archivos **RINEX** como datos de origen.

**Contenido de la primera entrega del proyecto** Para la primera entrega del informe del *proyecto de investigación en el aula*, para una completa fase de investigación, es necesario que en el trabajo se encuentren expuestos las siguientes temáticas:

- Introducción
- Sistema GNSS.
- Señales utilizadas en los sistemas GNSS. Señales utilizadas en el GNSS GLONASS.
- Proceso de adquisición de señales (*GNSS Acquisition*).
- Seguimiento de parámetros de señales (*GNSS tracking*). Observables del *tracking*.
- Procesamiento secundario: cálculo de coordenadas GNSS.
  - Tiempo **GPS** y **GLONASS**.
  - Sistemas de coordenadas GNSS: **GPS** y **GLONASS**. Modelo de la tierra.
- Formato **RINEX** Descripción general y evolución.
  - Filosofía del formato.
  - Tipos y versiones de formatos **RINEX**.
  - **RINEX 3.0**.
  - Fuentes de archivos **RINEX** en Colombia.
  - Descripción de un conjunto particular de observables GNSS en el formato **RINEX 3.0**.
- **The Easy Suite** : ¿Qué es el Easy Suite y cómo utiliza los archivos RINEX en Matlab?
- Conclusiones.
- Apéndices.
- Fuentes bibliográficas especializadas.

**Entregable** Documento informe con los temas propuestos. Máximo 5-10 páginas.

### 4. Proyecto Nuevos métodos de estimación espectral de señales GNSS

#### Descripción del proyecto

Como resultado final del *proyecto de investigación en el aula* será desarrollada una plataforma de adquisición de señales GNSS mediante la implementación de nuevos métodos de análisis espectral. Los distintos métodos se definirán, enumerarán sus propiedades e implementarán en *matlab*. Como resultado se realizará una comparación de estos métodos con la ya implementada transformada rápida de Fourier (FFT).

Se deberá presentar un informe completo de acuerdo al formato de trabajos L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X, adjuntando a su vez los códigos utilizados para su desarrollo, tanto *.tex*, como los *scripts* de Matlab si se implemento simulación. Los códigos deben ser genéricos y con comentarios, y se deben adjuntar los archivos utilizados.

## 4.1. Objetivo

Analizar, caracterizar e implementar nuevos métodos de estimación espectral en señales de los sistemas globales de navegación por satélite.

**Contenido de la primera entrega del proyecto** Para la primera entrega del informe del *proyecto de investigación en el aula*, para una completa fase de investigación, es necesario que en el trabajo se encuentren expuestos las siguientes temáticas:

- Sistemas de navegación por satélite.
- Características energéticas y espectrales de las señales.
- Definición de estimación espectral.
  - Correlación: significado, propiedades. Autocorrelación.
  - Espectro de una señal.
  - Densidad espectral de potencia (PSD, *ing.* Power Spectral Density).
  - Relación entre la PSD y la correlación.
- Señales utilizadas en los sistemas GNSS.
  - Señales utilizadas en el GNSS GPS.
  - Esquema de formación de la señal GPS.
  - C/A Code
  - Secuencia **Gold**
    - Generación de la secuencia **Gold**
    - Propiedades de correlación.
- Señales de GNSS recibidas: Fase aleatoria y contaminadas de ruido. Caracterización de la relación señal-ruido (SNR).
- Conclusiones.
- Apéndices.
- Fuentes bibliográficas especializadas.

**Entregable** Documento informe con los temas propuestos. Máximo 5-10 páginas.

## 5. Proyecto Aplicación Android para posicionamiento en interiores

### Descripción del proyecto

En este proyecto se busca utilizar los sensores de GPS, acelerómetro, Bluetooth y giroscopio de los celulares para así poder orientar la navegación de personas haciendo uso de una aplicación móvil, desarrollada para el sistema operativo Android. A partir del desarrollo de este proyecto se espera contar con los insumos necesarios (módulos de software) que permitan llevar a cabo el desarrollo de una aplicación que posiblemente genere algún impacto social beneficioso para la población invidente y con dificultades de movilidad. Haciendo uso de tecnología a Wi-Fi y BLE, se pretende realizar una aplicación móvil externa que permita la navegación de personas invidentes en recintos cerrados como edificios, parqueaderos, centros comerciales, etc. Estos datos sensados serán enviados a un servidor web que estará gestionado por un administrador de forma periódica o al ejecutar una acción. Para poder almacenar los datos y gestionar los datos es posible desarrollar una aplicación web alojada en *Google App Engine*.

## Objetivo

Implementar módulos de software para plataforma Android que permita avanzar en el desarrollo de una aplicación móvil que facilite a las personas invidentes navegar de manera independiente en lugares cerrados, basada en la interacción con balizas de tecnología BLE (BLE beacons), Wi-Fi, IMU y podómetro.

### Objetivos específicos:

- Analizar las diversas tecnologías de desarrollo móvil para determinar cual es la mejor alternativa para el desarrollo de los módulos de software.
- Realizar el diseño y la implementación de un software para móviles Android que permita detectar e interpretar balizas BLE usando formatos *iBeacon*, *Eddystone* y tramas Wi-Fi.
- Realizar el diseño y la implementación de un software para plataformas Android que permita integrar los datos obtenidos de las beacons (balizas) BLE y tramas de Wi-Fi, además de la información de los sensores acelerómetro, magnetómetro y giroscopio del dispositivo móvil, y su podómetro.
- Implementar un mecanismo de comunicación entre el dispositivo móvil y una base de datos remota para registrar de forma segura la información obtenida.
- Establecer e implementar un protocolo de pruebas de funcionamiento para cada uno de los módulos del sistema.

## Contenido de la primera entrega del proyecto

Para la primera entrega del informe del *proyecto de investigación en el aula*, para una completa fase de investigación, es necesario que en el trabajo se encuentren expuestos las siguientes temáticas:

- Introducción
- Sensores en un teléfono móvil inteligente
- Localización en entornos interiores
  - Tecnologías para localización en interiores: Wi-Fi, BLE e IMU.
  - Definición de RSSI (Received Signal Strength Indicator)
  - Técnica de posicionamiento *fingerprinting* (análisis de escena)
  - Podómetro y su funcionamiento.
- Beacon Bluetooth
  - Beacon Bluetooth del fabricante *Estimote* (especificaciones y características técnicas)
  - Describa la trama de una señal BLE que utiliza los protocolos *iBeacon* y *Eddystone* (diferencias)
- Describa la trama de una señal WiFi (broadcast)
- Desarrollo móvil
  - Beacon Bluetooth del fabricante *Estimote* (especificaciones y características técnicas)
  - Describa la trama de una señal BLE que utiliza los protocolos *iBeacon* y *Eddystone* (diferencias)
  - Desarrollo nativo y sus ventajas
  - Aplicación web para dispositivos móviles y sus ventajas
  - ¿Qué es un diagrama de casos del sistema?
  - ¿Qué es un diagrama de actividades?
  - ¿Qué son los requisitos de software?
- *Google App Engine*
- Bases de datos

- Almacenamiento de datos en base de datos SQL y noSQL
- *SQLite*
- Conclusiones.
- Apéndices.
- Fuentes bibliográficas especializadas.

**Entregable** Documento informe con los temas propuestos. Máximo 5-10 páginas.

## 6. Proyecto Aplicación en Raspberry Pi para el posicionamiento en interiores

### Descripción del proyecto

En este proyecto se busca utilizar los sensores de GPS, acelerómetro, Bluetooth, Wi-Fi, UWB y giroscopio para así poder orientar la navegación de personas haciendo uso de una plataforma de hardware Raspberry Pi. A partir del desarrollo de este proyecto se espera contar con los insumos necesarios (módulos de software) que permitan llevar a cabo el desarrollo de una aplicación que posiblemente genere algún impacto social beneficioso para la población invidente y con dificultades de movilidad.

### Objetivo

#### General

Desarrollar un prototipo hardware utilizando una Raspberry Pi que permita la adquisición de información de interés de un sensor inercial, señales UWB y de *beacons* Wi-Fi y BLE, para el computo de métricas utilizadas por las técnicas de posicionamiento en localización de objetos en ambientes interiores.

#### Objetivos específicos:

- Determinar el conjunto de métricas necesarias por las técnicas de posicionamiento inalámbricas.
- Realizar el diseño y la implementación de un software basado en el lenguaje de programación *Python*, que permita detectar e interpretar beacons (balizas) BLE usando formatos *iBeacon* y *Eddystone*, además de tramas Wi-Fi. Adicionalmente debe permitir leer los datos de una IMU, un módulo GPS y un sensor UWB.
- Guardar los datos sensados en una base de datos local y generar un documento que contenga la información de estas variables físicas para un estudio posterior.
- Implementar un mecanismo de comunicación entre el dispositivo móvil y una base de datos remota para registrar de forma segura la información obtenida.
- Establecer e implementar un protocolo de pruebas de funcionamiento para cada uno de los módulos del sistema.

**Contenido de la primera entrega del proyecto** Para la primera entrega del informe del *proyecto de investigación en el aula*, para una completa fase de investigación, es necesario que en el trabajo se encuentren expuestos las siguientes temáticas:

- Introducción
- Sistemas GNSS.
- Localización en entornos interiores
  - Tecnologías para localización en interiores: Wi-Fi, BLE e IMU.
  - Definición de RSSI (Received Signal Strength Indicator)



- Técnica de posicionamiento *fingerprinting* (análisis de escena)
- Beacon Bluetooth
  - Beacon Bluetooth del fabricante *Estimote* (especificaciones y características técnicas)
  - Describa la trama de una señal BLE que utiliza los protocolos *iBeacon* y *Edystone* (diferencias)
- Describa la trama de una señal Wi-Fi (broadcast)
- Sistema embebidos
  - Plataforma de hardware Raspberry Pi
  - Protocolos de comunicación: I2<sup>2</sup>C, UART, SPI.
- Sensores para la Raspberry Pi
  - *Sense HAT*
  - *Adafruit* 9-DOF Absolute Orientation IMU Fusion Breakout
  - Modulo GPS para Raspberry Pi: *Adafruit* Ultimate GPS Breakout
  - *Decawave* DWM1001 Development board
- Bases de datos
  - Almacenamiento de datos en base de datos SQL y noSQL
  - *SQLite*
- Interfaces de aplicación en la nube: AWS, Azure, Ubidots, Thingspeak
- Conclusiones.
- Apéndices.
- Fuentes bibliográficas especializadas.

**Entregable** Documento informe con los temas propuestos. Máximo 5-10 páginas.

## 7. Evaluación de proyectos

La presente actividad se realiza con el objetivo de fortalecer las competencias académicas de los estudiantes del programa de ingeniería electrónica de la **Universidad Sergio Arboleda**, mediante distintas propuestas de actividades de investigación, las cuales a su vez son problemas actuales de la ingeniería. Esta actividad de investigación será **evaluada** con la **calidad** que se habría de esperar de un estudiante de **ingeniería de semestres avanzados**. Es un proyecto de carácter investigativo, el cual estará dividido en tres fases. Cada fase se calificará de 0.00 a 5.00. Las preguntas y temáticas planteadas en las distintas etapas del proyecto de aula deben ser presentadas sin excepción en el **formato de trabajos propuesto** para este curso<sup>1</sup>.

Los trabajos que se envíen por la web, pero no se entreguen en físico (o viceversa) se tomarán como no entregado. No se aceptará el Proyecto de investigación fuera de la fecha estipulada (a menos que la demora sea resultado de una ausencia justificada oficialmente) sin excepción.

El proyecto con mayor calificación será exonerado del examen final. Si el proyecto llegara a obtener el primer puesto en la feria de proyectos, la calificación total de corte será de 5.0.

Durante la evaluación, se tendrá un alto grado de atención a la calidad de los recursos y fuentes bibliográficas utilizadas, las cuales deben ser indexadas y de calidad garantizada (DOI, ISBN, etc.). No se acepta bibliografía de otro tipo, en especial páginas de Internet de origen dudoso. Incluso en el caso de utilizar una fuente con licencia de dominio público o Copyleft, (Ver: <http://creativecommons.org/>), el estudiante debe proporcionar la atribución de ese trabajo con el fin de mantener las políticas de autoría y modelos de contratos de licenciamiento. El estudiante debe establecer claramente la autoría de su trabajo. Plagio y trampa durante algún tipo de evaluación se reflejará en una anulación automática de esta y su respectivo reporte ante la dirección de programa para los respectivos correctivos, consulte el *Reglamento Estudiantil*.

<sup>1</sup>Trabajo que no cumpla el formato no se calificará.

Las rubricas de evaluación serán presentadas más adelante. **Nota:** Si existen problemas para conseguir un artículo, libro o capítulo de libro, por favor comunicarlo al docente. En adjuntos deben estar todos los *datasheet*, los códigos en lenguaje de programación, imágenes de alta calidad, etc.

## Referencias

- [1] M. Terán, J. Aranda, H. Carrillo, D. Mendez, and C. Parra. Iot-based system for indoor location using bluetooth low energy. In *2017 IEEE Colombian Conference on Communications and Computing (COLCOM)*, pages 1–6, Aug 2017.
- [2] J. Alonso, C. Bayona, O. Rojas, M. Terán, J. Aranda, H. Carrillo, and C. Parra. Iot solution for data sensing in a smart campus using smartphone sensors. In *2018 IEEE Colombian Conference on Communications and Computing (COLCOM)*, May 2018.
- [3] V. Honkavirta, T. Perala, S. Ali-Loytty, and R. Piche. A comparative survey of wlan location fingerprinting methods. In *2009 6th Workshop on Positioning, Navigation and Communication*, pages 243–251, March 2009.
- [4] Annette Zimmermann Tim Zimmerman. Magic quadrant for indoor location services, global report. Global report 28, Gartner, January 2019.
- [5] Gina Chung James Macaulay, Lauren Buckalew. Internet of things in logistics — a collaborative report by dhl and cisco on implications and use cases for the logistics industry. DHL Trend Research, Cisco Consulting Services, 2015. Accessed: 2015-11-17.
- [6] P.D. Groves. *Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems*. GNSS technology and applications series. Artech House, 2008.
- [7] Yunhao Liu, Zheng Yang, Xiaoping Wang, and Lirong Jian. Location, localization, and localizability. *Journal of Computer Science and Technology*, 25(2):274–297, Mar 2010.
- [8] Dimitrios Lymberopoulos, Jie Liu, Xue Yang, Romit Roy Choudhury, Vlado Handziski, and Souvik Sen. A realistic evaluation and comparison of indoor location technologies: Experiences and lessons learned. In *Proceedings of the 14th International Conference on Information Processing in Sensor Networks, IPSN '15*, pages 178–189, New York, NY, USA, 2015. ACM.
- [9] D. Lymberopoulos and J. Liu. The microsoft indoor localization competition: Experiences and lessons learned. *IEEE Signal Processing Magazine*, 34(5):125–140, Sept 2017.
- [10] Peter Corke. *Robotics, Vision and Control: Fundamental Algorithms In MATLAB, Second Edition*. Springer Publishing Company, Incorporated, 2nd edition, 2017.
- [11] Fredrik Gustafsson. *Statistical Sensor Fusion*. Studentlitteratur AB, Lund, Sweden, 2nd ed. edition, May 2013.
- [12] Kai Borre, Dennis M Akos, Nicolaj Bertelsen, Peter Rinder, and Søren Holdt Jensen. *A software-defined GPS and Galileo receiver: a single-frequency approach*. Springer Science & Business Media, 2007.
- [13] Reza Zekavat and R. Michael Buehrer. *Handbook of Position Location: Theory, Practice and Advances*. Wiley-IEEE Press, 1st edition, 2011.
- [14] Chyigang Kuo, Taysheng Jeng, and Itung Yang. An invisible head marker tracking system for indoor mobile augmented reality. *Automation in Construction*, 33:104 – 115, 2013. Augmented Reality in Architecture, Engineering, and Construction.
- [15] Kai Borre, Dennis M Akos, Nicolaj Bertelsen, Peter Rinder, and Søren Holdt Jensen. *A software-defined GPS and Galileo receiver: a single-frequency approach*. Springer Science & Business Media, 2007.

- 
- [16] Alan V Oppenheim, Ronald W Schafer, John R Buck, and Javier Portillo García. *Tratamiento de señales en tiempo discreto*, volume 2. Prentice Hall México, 2000.
  - [17] Ralph D Hippenstiel. *Detection theory: applications and digital signal processing*. CRC Press, 2010.
  - [18] John G Proakis. *Digital signal processing: principles, algorithms, and application-3/E*. 1996.
  - [19] Dimitris G Manolakis, Vinay K Ingle, and Stephen M Kogon. *Statistical and adaptive signal processing: spectral estimation, signal modeling, adaptive filtering, and array processing*, volume 46. Artech House Norwood, 2005.