

Aplicación de la transformada de Hilbert-Huang en el análisis de señales de comunicación satelital

Villanueva, J.^{a, *}, Bueno, M.^b, Simón, J.^a, Molinas, M.^c, Flores, J.^d, Mendez, P.E.^e

^aCentro de Investigación, Innovación y Desarrollo en Telecomunicaciones, CONACYT - Universidad Autónoma de Zacatecas, Av. López Velarde 801, Col. Centro, C.P. 98010, Zacatecas, México.

^bDepartamento de Electrónica, Instrumentación y Control, Universidad del Cauca, Calle 5 No. 4-70, Popayán, Cauca, Colombia.

^cDepartment of Engineering Cybernetics, Norwegian University of Science and Technology, 7491 Trondheim, Norway

^dUnidad Académica de Ingeniería Eléctrica, Centro de Investigación, Innovación y Desarrollo en Telecomunicaciones, Universidad Autónoma de Zacatecas, Av. López Velarde 801, Col. Centro, C.P. 98010, Zacatecas, México.

^eInstituto de Investigaciones en Matemáticas Aplicadas y en Sistemas, Campus Mérida, Unidad Académica de Ciencias y Tecnología de la UNAM, Parque Científico y Tecnológico de Yucatán, Km. 5.5 Carretera Sierra Papacal-Chuburná, C.P. 97302, Sierra Papacal, Yucatán, México.

To cite this article: Villanueva, J., Bueno, M., Simón, J., Molinas, M., Flores, J., Mendez, P. 2020. Application of Hilbert-Huang transform in the analysis of satellite-communication signals. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial* 17 181-189. <https://doi.org/10.4995/riai.2019.10878>

Resumen

En los enlaces de comunicación entre satélites y estaciones terrenas, la señal transmitida está expuesta a perturbaciones y ruido de diferentes tipos que dificultan la recepción y recuperación de la información. Por esta razón, diferentes métodos son utilizados para procesar la señal recibida y eliminar dichas perturbaciones, y así recuperar la información. Diferentes técnicas de análisis de señales se han utilizado para lograr lo anteriormente descrito pero los resultados no son completamente satisfactorios. La Transformada de Hilbert Huang ha venido aplicándose cada vez más en diferentes áreas y las señales satelitales no son la excepción. En este trabajo, se realiza el análisis mediante la Transformada de Hilbert Huang de una señal de comunicación satelital que presenta ruido gaussiano; el propósito es eliminar las perturbaciones del ruido y poder recuperar la señal transmitida. La estrategia propuesta es comparada con la Transformada Rápida de Fourier la cual normalmente es usada para estas aplicaciones. Algunos resultados con señales simuladas y reales son mostradas para validar la metodología.

Palabras clave: Análisis de señales de comunicación satelital, descomposición de modo empírico, frecuencia instantánea, transformada de Hilbert Huang

Application of Hilbert-Huang transform in the analysis of satellite-communication signals

Abstract

In communication links between satellites and ground stations, the transmitted signal is exposed to disturbances such as noise of different types that hinder reception or retrieval of information. For that reason, different methods are used to process the received signal and to remove these perturbations, and thus recover the information. Different techniques of signal analysis have been used to achieve the above described but the results are not completely satisfactory. The Hilbert Huang Transform has been applied increasingly in different areas and satellite signals are not the exception. In this work, a study where the Hilbert-Huang transform is used to analyze the received signal and to remove these perturbations, and thus recover the transmitted signal is presented.

Keywords: Satellite-communication signals, empirical-mode-decomposition, instant-frequency, Hilbert Huang transform

*Autor para correspondencia: jvillanuevama@conacyt.mx, mbuenol@unicauca.edu.co

1. Introducción

Hoy en día, la comunicación satelital tiene un rol muy importante en el sector de las telecomunicaciones, ya que se encuentra prácticamente en todos los aspectos de la vida de los seres humanos. En las comunicaciones inalámbricas, los satélites son la tecnología fundamental para la infraestructura de las comunicaciones globales, estos son utilizados en diferentes aplicaciones importantes dentro de la vida moderna como son la telefonía inalámbrica, prevención de desastres, la vigilancia militar, las investigaciones de la tierra y el espacio, los sistemas de posiciones globales (GPS), entre otros (Stone (2004)). La señal que se trasmite viaja interactuando con el entorno entre el transmisor y el receptor, y finalmente la señal que recibe el receptor presenta perturbaciones y atenuación de energía, debido a que la señal se refleja en edificios, postes de luz y otros objetos, y tienen contacto con todo tipo de ruido como son cósmico, atmosférico y electromagnético. Así también, la señal recibida esta constituida por muchas componentes de diferentes señales de propagación, es decir, multitrayectos (Yu and Qian (2010)).

Para solucionar estos problemas, se utilizan teorías y metodologías de procesamiento de señales, así como también conceptos de antenas y propagación, comunicaciones y teoría de la información. En la actualidad la teoría desarrollada por Joseph Fourier para el análisis de señales ha sido suficiente en múltiples áreas del conocimiento, sin embargo en procesos complejos como el referido, las metodologías clásicas no tienen el mejor desempeño.

En (Huang and Shen (2014)) se presenta la aplicación de la Transformada de Hilbert-Huang (HHT por sus siglas en inglés correspondientes a Hilbert-Huang Transform) como un banco de filtros para diferentes casos. En el primer ejemplo se utiliza una señal simple. En los siguientes casos se utilizan señales de AM y FM en estado estacionario que presentan cambios en amplitud y frecuencia. En (Wu and Huang (2009)) se presenta el método EMD por conjuntos (EEMD por sus siglas en inglés equivalentes a Ensemble Empirical Mode Decomposition) basado en análisis de ruido añadido inspirado en la aplicación del EMD como bancos de filtro mostrado en (Huang and Shen (2014)). Esta metodología ha reportado algunos casos de estudio aplicados a las comunicaciones como se puede observar en (Yingjun Yuan and Wang (2013)) donde se propone un nuevo método de identificación del emisor basado en una distribución de tiempo-frecuencia-energía mediante la HHT.

El inicio del transitorio se detecta usando el método basado en fase y el punto final del transitorio se detecta usando un umbral autoadaptativo basado en la trayectoria de energía basada en HHT. En (E. Hari Krishna and Reddy (2012)) se muestra la estimación de canal de multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFMD por sus siglas en inglés) mediante el uso de la descomposición de modo empírico (EMD) basada en el análisis de tiempo-frecuencia. Mientras que (Wang and Wang (2013)) propone un método de transformación de onda continua (CWT por sus siglas en inglés) multiescala y el análisis de componentes independientes con el objetivo de resolver el problema de separación ciega de canal simple (single-channel blind separation) en señales de comunicaciones superpuestas en el dominio tiempo-frecuencia. Así también, esta metodología ha reportado otros casos como se puede observar en (Hao Chen and Liu (2013); Huang Yuchun and Shuhua (2007)).

La Transformada de Hilbert-Huang está compuesta de dos partes: la Descomposición en Modo Empírico y Análisis Espectral de Hilbert (EMD y HSA por sus siglas en inglés, respectivamente). El método EMD es una técnica de análisis de datos adaptivo que consiste en descomponer una señal en sus diferentes componentes frecuenciales conocidas como Funciones de Modo Intrínseco (IMF, por sus siglas en inglés).

En la actualidad, los nanosatélites desempeñan un papel muy importante dentro de la investigación y el desarrollo espacial, así como en las misiones comerciales. En los últimos años, se ha observado un crecimiento exponencial en el lanzamiento y puesta en órbita de nanosatélites en el espacio, siendo que para 2014 ya existían 206 nanosatélites en órbita (Dowel (2014)).

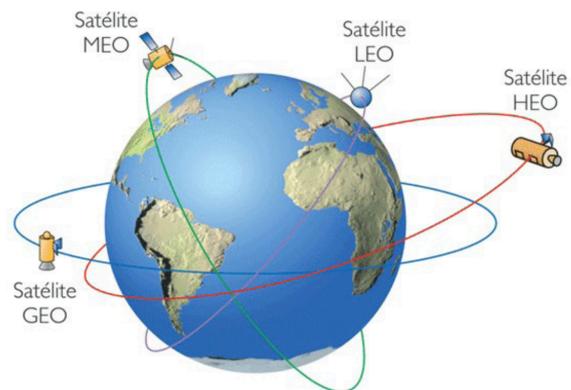


Figura 1: Tipos de órbita terrestre (N.Padmaja and R.Swathi (2011)).

Los nanosatélites que son lanzados a una “Órbita Terrestre Baja”(LEO: Low Earth Orbit) siguen una trayectoria polar y pueden llegar a velocidades de 27000 Km/h, y la altura a la que se encuentran estos pequeños satélites va desde los 100 hasta los 1,500 Km (ver Figura 1), (N.Padmaja and R.Swathi (2011)). Dentro de estas órbitas bajas la potencia necesaria para transmisión y recepción de información es menor en comparación con las órbitas superiores. Las órbitas LEO presentan una atmósfera densa, radiación electromagnética y radiación de partículas donde la mayor parte proviene directamente del sol, así también, del campo magnético de la tierra y de manera significativa se tiene radiación cósmica y radiación de partículas. Esto provoca que la señal recibida por el receptor presente perturbaciones y atenuación de energía, así como reflejo de la misma provocado por edificios altos, postes de luz y otros objetos que interfieren la línea de vista del canal.

En este trabajo se emplea una estrategia de análisis que pueda ofrecer respuestas más adecuadas a las exigencias de sistemas de alta complejidad. La Transformada de Hilbert-Huang es una técnica de análisis en tiempo-frecuencia que utiliza el concepto de frecuencia instantánea lo cual permite observar con una adecuada resolución como la frecuencia va cambiando con el tiempo, y que ofrece una mayor resolución y mejor precisión en eventos transitorios, no lineales y no estacionarios de señales que las técnicas convencionales como las transformadas de Fourier y Wavelet (Bueno-Lopez et al. (2017b), Gasca Segura et al. (2018)).

El presente trabajo está organizado de la siguiente forma. En la sección 2 se describe brevemente el sistema satelital, la sección 3 explica la transformada de Hilbert Huang, en conjunto con el algoritmo de Descomposición en Modos Empíricos mientras que en la sección 4 se indica la metodología empleada para el análisis de dos casos de señal satelital, 4.1 se describen los dos casos de estudio y la sección 5 presenta los resultados de las descomposiciones obtenidas con el EMD estándar. Finalmente en la sección 6 se presentan algunas conclusiones y discusiones sobre los resultados obtenidos.

2. Descripción del Sistema Satelital

El Centro de Investigación, Innovación y Desarrollo en Telecomunicaciones de la Universidad Autónoma de Zacatecas, ha desarrollado un nanosatélite denominado "Zacatecas I" (Z1, ver Figura 2¹) del tipo tubesat con dimensiones de 13 cm de altura y 9.5 cm de diámetro y un peso de 437 grs. que transmite a una frecuencia de 436.6 MHz. Se transmiten datos de telemetría que provienen de sensores como son:

- Un giroscopio de 3 ejes
- Una brújula de 3 ejes
- Un acelerómetro de 3 ejes
- Presión / temperatura barométrica.

El sistema de comunicación está integrado por un radio (TR2M-436.50-10-ARS 25kHz NBFM) y un amplificador (AFS2-436) de la marca Radiometrix. El radio tiene como características el ser multicanal, de banda angosta (25 KHz) y que emplea modulación en frecuencia (FM) de 435 MHz a 438 MHz, una potencia nominal de transmisión de 100mW, un consumo de corriente de 110mA en T_x y 27mA en R_x y una velocidad de bits de datos de 5kbps máx. (Radiometrix (2010b)). Mientras que el amplificador tiene una potencia de salida de RF de 500 mW (para una entrada de 100 mW) y bajo consumo de corriente: 250mA en T_x , <2mA en R_x (Radiometrix (2010a)).

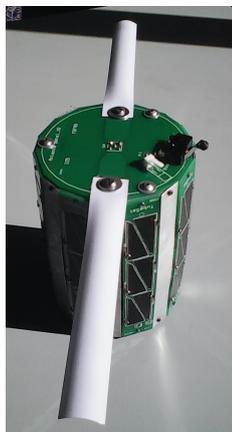


Figura 2: Nanosatelite del tipo Tubesat denominado "Zacatecas I".

3. Transformada de Hilbert Huang

La transformada de Hilbert-Huang (HHT), combina el espectro de Hilbert con la Descomposición en Modos Empíricos (EMD por sus siglas en inglés equivalentes a Empirical Mode Decomposition), propuesta por Norden Huang (Huang et al. (1998)). Esta herramienta fue desarrollada pensando en el análisis de señales no lineales y no estacionarias, estas normalmente no pueden ser analizadas con métodos tradicionales como Fourier y Wavelets. La HHT consiste en expandir la serie temporal en un número finito de modos base derivados de los propios datos (Funciones de Modos Intrínsecos, IMF) mediante el algoritmo EMD para luego aplicar la transformada de Hilbert y de esta manera estimar la distribución Tiempo-Frecuencia-Energía, denominada Espectro de Hilbert. Sobre cada una de las IMFs obtenidas se puede aplicar la transformada de Hilbert y obtener la frecuencia instantánea, así como el espectro de Hilbert. La EMD ha demostrado tener algunas limitaciones cuando en la señal existen componentes frecuenciales muy cercanas entre sí, este fenómeno recibe el nombre de mezcla de modos (Mode Mixing en inglés) y será tratado más adelante. El objetivo del método EMD es descomponer una señal no lineal y no estacionaria multicomponente $y(t_k)$ en una suma de diferentes señales monoccomponentes denominadas Funciones de Modos Intrínsecos que cumplen con dos condiciones (Mandic et al. (2013)):

1. Simetría en las envolventes superiores e inferiores (Media cero)
2. El número de extremos y el número de cruces por cero debe ser el mismo o diferir exactamente en uno

El algoritmo EMD para la señal $y(t_k)$ se resume como:

1. Identificar todos los extremos (máximos y mínimos) en $y(t_k)$.
2. Interpolarse entre máximos y mínimos, generando las envolventes $e_l(t_k)$ y $e_m(t_k)$.
3. Determinar la media local como $m(t) = (e_l(t_k) + e_m(t_k))/2$.
4. Obtener el residuo $r(t_k) = y(t_k) - m(t_k)$.
5. En base a las dos condiciones mencionadas de las IMFs, decidir si $r(t_k)$ es o no una función de modo intrínseco.
6. Repetir los pasos del 1 al 4 hasta que $r(t_k)$ tenga tendencia monotónica o sea constante en t .

La Descomposición en Modos Empíricos es aplicada sobre $\vec{y}(t_k)$ para obtener $\vec{\gamma}_i(t_k)$ siendo i la función de modo intrínseco (IMF), y

$$\vec{y}(t_k) = \sum_{i=1}^N \vec{\gamma}_i(t_k) + \vec{r}(t_k) \quad (1)$$

donde N es el número de IMFs y $\vec{r}(t_k)$ es un residuo. Recientemente, (Xu et al. (2016) y Hou and Shi (2013)) propusieron algunas técnicas de optimización para mejorar el rendimiento del EMD.

$$f_i(t) \triangleq \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d\theta_i(t)}{dt}, \quad (2)$$

donde $\theta_i(t)$ es la fase instantánea de cada IMF calculada a partir de la señal analítica asociada (Boashash (1992)). Finalmente, la frecuencia instantánea se puede observar en el espectro de Hilbert.

¹Se espera ser puesto en órbita en futuro próximo.

4. Descripción de la Metodología

En un sistema de comunicación en general se desea que el mensaje a transmitir llegue completo y sin problemas hasta el destino. Sin embargo, la señal al viajar por el canal de transmisión se ve afectada por ciertos factores como:

- Medio de transmisión que se use
- Interferencias producidas por el hombre
- Interferencias producidas por la naturaleza del medio, por ejemplo, las vibraciones térmicas, radiación cósmica, ruido atmosférico, entre otras.

De los factores mencionados, existe uno que siempre se encuentra presente en el sistema, este se llama **Ruido No Correlacionado**. Siendo el más común de encontrar en los sistemas de comunicación el ruido **AWGN** (*Ruido Blanco Gaussiano Aditivo*). Así también, la señal satelital puede presentar una modulación, de tipo: AM,FM,PM,ASK,FSK,PSK,QAM, entre otras. De esta manera, en este trabajo se presenta el análisis de la aplicación del método de HHT en señales satelitales, el cual se llevó a cabo por medio del estudio de dos casos². En cada caso, se utilizo una señal con distinta modulación con el objetivo de examinar de mejor manera el comportamiento del método de HHT ante dos tipos de modulación.

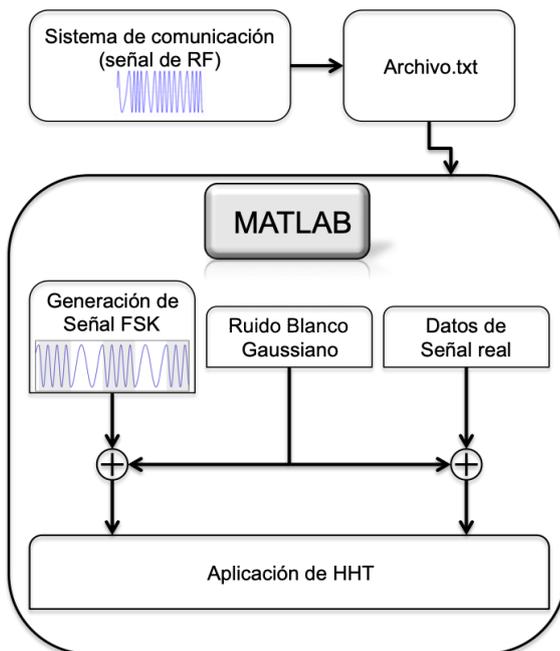


Figura 3: Diagrama del método de aplicación del HHT.

Para el primer caso se realizó el análisis de una señal simulada, donde se creó un vector de datos digitales a los cuales se les aplicó una modulación FSK (por sus siglas en inglés: Frequency Shift Keying) emulando de esta manera una señal satelital con frecuencia de 433 MHz (ver Fig.3). En el segundo caso, se obtuvo la señal del nanosatélite Zacatecas 1, la cual sale del amplificador del módulo de radiofrecuencia satélite pequeño,

como se muestra en la Fig. 3. En ambos casos se le añadió Ruido Blanco Gaussiano Aditivo (AWGN, por sus siglas en inglés) a las señales con una relación señal a ruido (SNR) de 7 dB para así emular la señal recibida (R_x) con perturbaciones.

4.1. Descripción de las series de datos empleadas.

En esta sección se describen ambas señales satelitales utilizadas para el estudio de la aplicación de la HHT.

4.1.1. C1: Señal simulada FSK.

Para este caso, se generó una serie de datos de manera aleatoria y dos señales a diferentes frecuencias, con lo que se obtuvo la señal modulada FSK, posteriormente se le integro la señal portadora que presenta una frecuencia de 333 MHz como se observa en la Tabla 1. Se considera que la señal satelital T_x carece de perturbaciones antes de ser transmitida y al viajar por el canal de transmisión es afectada por diversos factores, representados como ruido blanco gaussiano aditivo R_G , que se presentan en la señal recibida R_x (ver Fig. 5). La señal R_x tiene una distorsión notoria debido al ruido y el objetivo de aplicar la HHT será eliminar las componentes indeseables y poder recuperar la señal original con la información enviada.

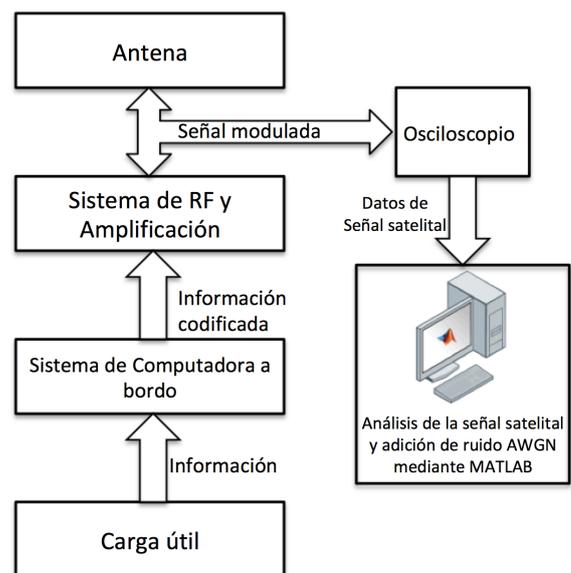


Figura 4: Obtención de la señal real del nanosatélite Z1

4.1.2. C2: Señal FM del satélite.

La aplicación de la HHT en señales reales se llevó a cabo fuera de línea, para esto, se obtuvo la señal t_x que transmite el nanosatélite denominado "Zacatecas 1" con el apoyo un osciloscopio modelo:MSO-X-6004A de *Agilent Technologies* (ver Fig. 7). La Figura 6 muestra el diagrama en la manera que se llevo a cabo la adquisición de la señal T_x . Como se observa, los datos son procesados por un microprocesador que se encuentra en el módulo de la computadora, los cuales pasan al modulo de transmisión y posteriormente al amplificador para ser enviados por la antena, donde se conecto el osciloscopio y se obtuvo la señal. La señal presenta una modulación FM a una frecuencia de 436.6 MHz, la cual es generada por el modulo TR2M-436.5,

²El análisis se hace a través del software de MATLAB

éste modula la frecuencia de la portadora de una forma sencilla y normal, para un voltaje de modulación más alto aumenta la frecuencia de la portadora y para el voltaje de modulación más bajo disminuye la frecuencia de la portadora (Radiometrix (2010a)).

Tabla 1: Código en Matlab para señal FSK.

Generación de señal modulada FSK
<pre> f1=0.95; f2=1.05; binario=[Datos^a]; Tsa=1/10000; t=0:Tsa:1-Tsa; t1=0:Tsa:length(binario)-Tsa; f1=sin(2*pi*f1*t); f2=sin(2*pi*f2*t); fsk=[]; for n = 1 : length(binario); if binario(n)==1; fsk=[fsk f1]; else fsk=[fsk f2]; end end f3=333.8; f3=sin(2*pi*f3*t1); Señal_fsk=f3.*fsk; </pre>

^aSe generó un vector de datos aleatorios.

5. Resultados

En esta sección presentamos los resultados obtenidos al aplicar la HHT en las señales descritas en la Sección 4. La Figura 8 muestra las IMF obtenidas para la señal R_x simulada. La señal se ha descompuesto en 13 bandas, cada una de estas con una oscilación y frecuencia diferente. La Figura 9 muestra las IMF obtenidas para la señal R_x real. En este caso la señal se ha descompuesto en 9 nuevas bandas. En ambos casos la primera IMF representan la señal de error (frecuencia más alta). Como se mencionó anteriormente, uno de los principales problemas de la HHT es la aparición de la mezcla de modos, esto se hace evidente en la descomposición presentada. Las IMF tienen diferentes oscilaciones, esto representa diferentes componentes frecuenciales. Para el caso de aplicación mostrado en este artículo el problema de mezcla de modos no es el objeto de estudio, sin embargo vale la pena mencionar que los resultados podrían ser mejorados al utilizar una señal máscara o EEMD Gasca Segura et al. (2018).

El comportamiento esperado de la descomposición es claro al observar las IMF, las oscilaciones van disminuyendo a medida que se descompone la señal y esto permite identificar con claridad la frecuencia instantánea.

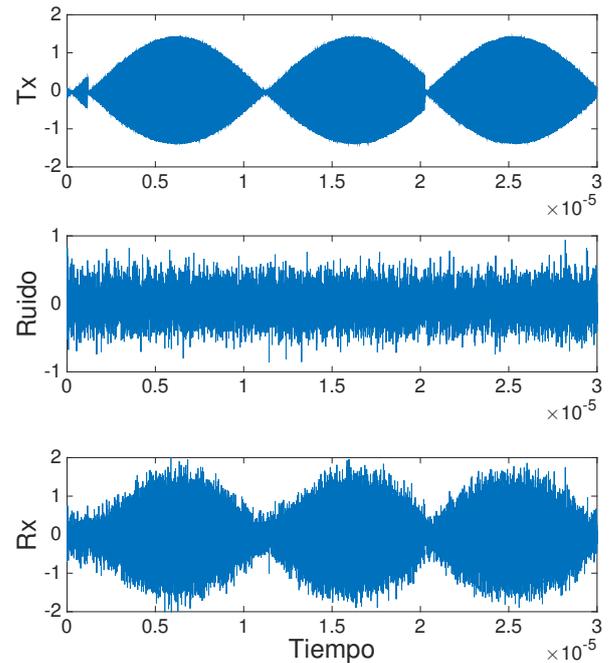


Figura 5: Simulación de señal satelital con modulación FSK y frecuencia 433 MHz.

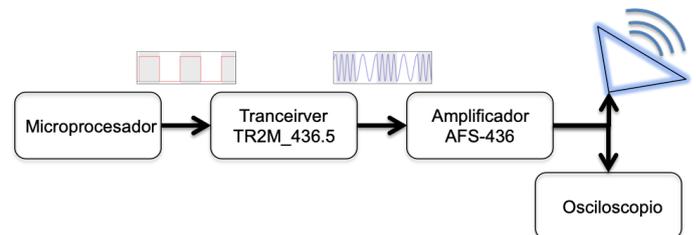


Figura 6: Obtención de datos reales

En la Figura 10 se puede observar la frecuencia instantánea de cada una de las IMF obtenidas para la señal R_x simulada. Lo mismo se observa en la Figura 11 pero con señales reales.

Una de las principales utilidades de la EMD es que se puede reconstruir la señal original a partir de una adecuada selección de las IMF, de esta manera se pueden eliminar componentes indeseadas y ruido. Hay diferentes criterios para el proceso de selección, en algunas ocasiones el cálculo de la energía y la entropía son de alta aplicación en esta área (Bueno-Lopez et al. (2017a)). Para el caso de estudio mostrado en este artículo hemos hecho una selección visual de las IMF que permiten recuperar la señal R_x . Las Figuras 12 y 13 muestran la señal a partir de la serie de tiempo simulada y real respectivamente. Como se mencionó en la sección 1, la Transformada de Fourier es uno de los métodos más empleados para el análisis de señales, por esta razón hemos aplicado la Transformada Rápida de Fourier (FFT) a la señal real y simulada transmitida. El objetivo es comparar la resolución de la HHT vs FFT. La Figura 14 muestra el espectro de Fourier para la señal simulada y la Figura 15 permite observar las componentes frecuenciales obtenidas al aplicar la FFT a la misma señal.

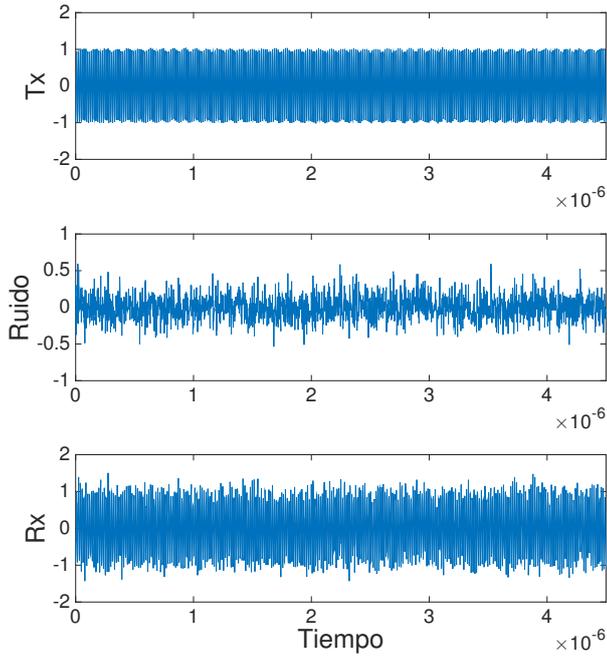


Figura 7: Señal RF con modulación FM del Zacatecas I.

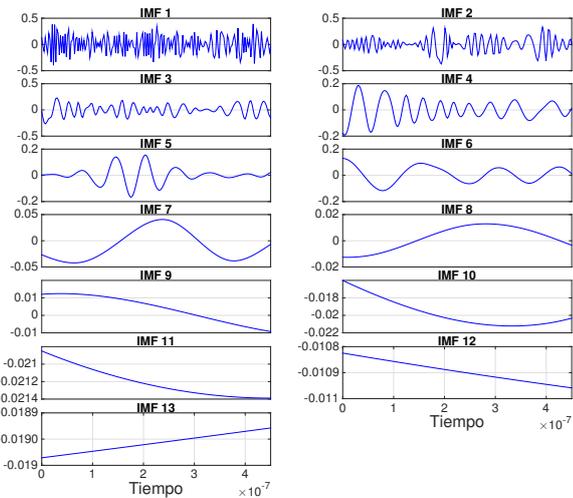


Figura 8: IMFs obtenidas de los datos simulados con modulación FSK a Frecuencia 433Mhz.

La Figura 16 muestra el espectro de Fourier para la señal real y la Figura 17 permite observar las componentes frecuenciales obtenidas al aplicar la FFT a la misma señal.

5.1. Análisis de error

En la Figura 18 se muestra la diferencia entre el ruido que fue adquirido por la señal original simulada durante su tránsito hasta el punto de recepción y el ruido detectado por la HHT el cual queda representado en la primera IMF. Lo mismo se observa en la Figura 19 pero con señales reales. El error cuadrático medio (MSE) para el caso de la señal emulada es del 5.6% mientras que para la señal real es de 2.8%.

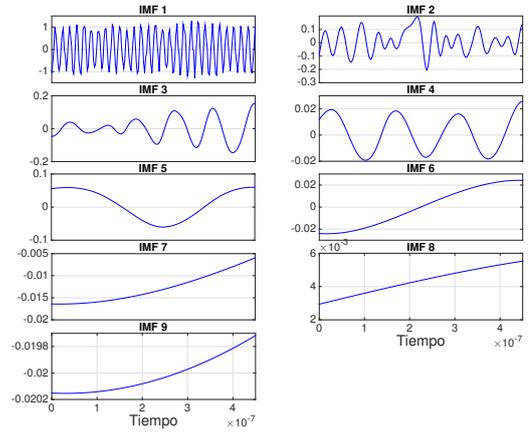


Figura 9: IMFs obtenidas de los datos reales.

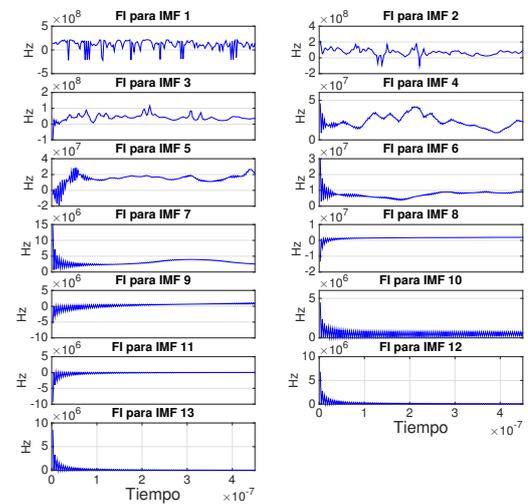


Figura 10: Frecuencia Instantánea datos simulados.

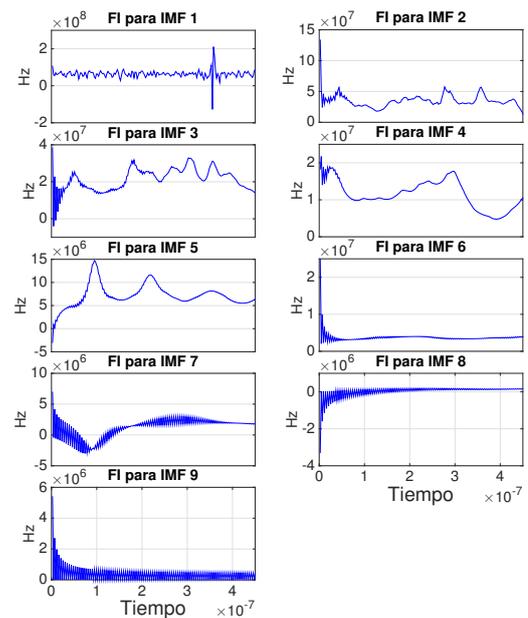


Figura 11: Frecuencia Instantánea datos reales.

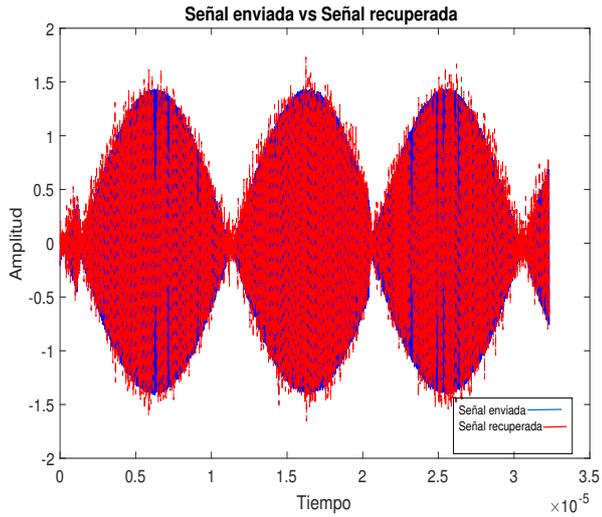


Figura 12: Señal simulada recuperada

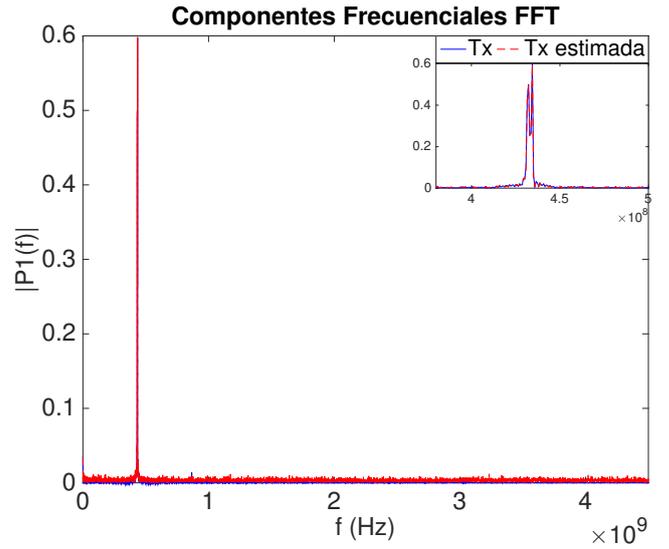


Figura 15: FFT señal simulada

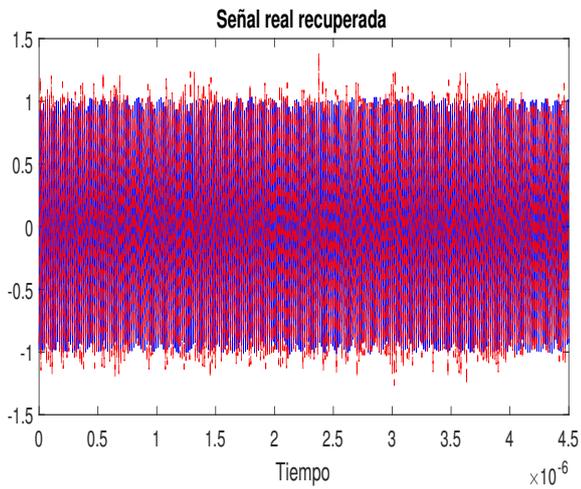


Figura 13: Señal real Recuperada

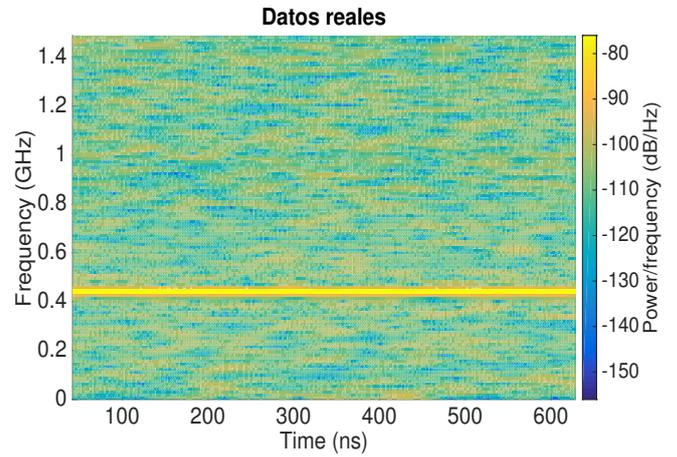


Figura 16: Espectro de Fourier señal real.

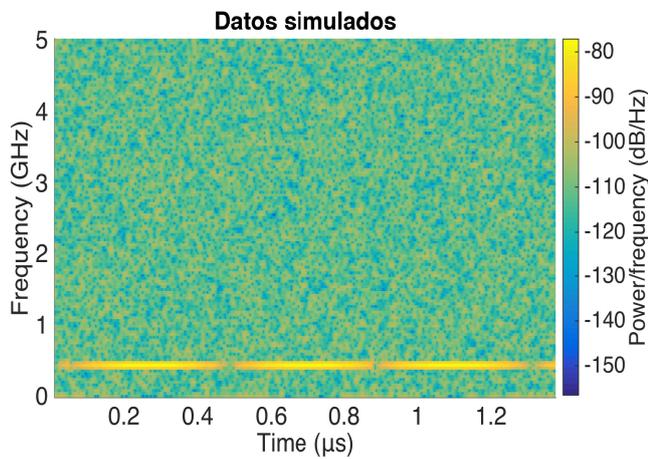


Figura 14: Espectro de Fourier señal simulada

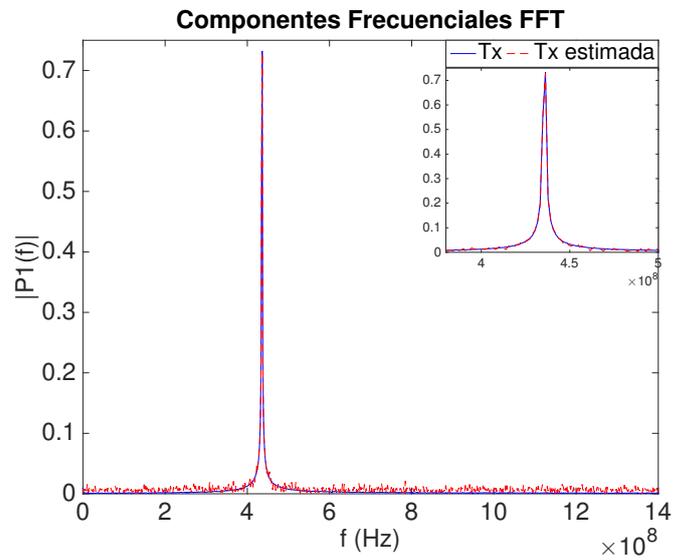


Figura 17: FFT señal real

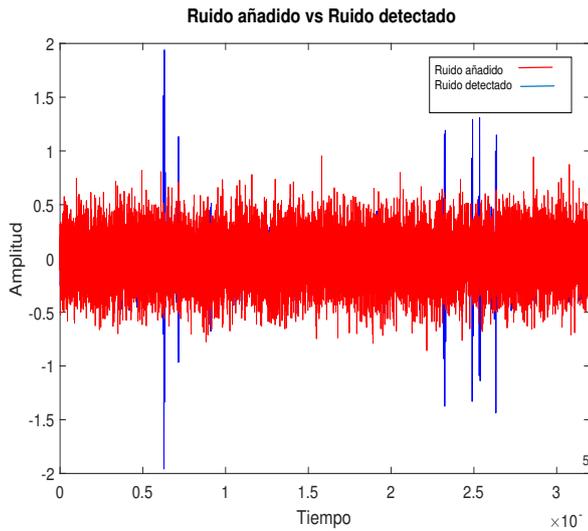


Figura 18: Error señal simulada.

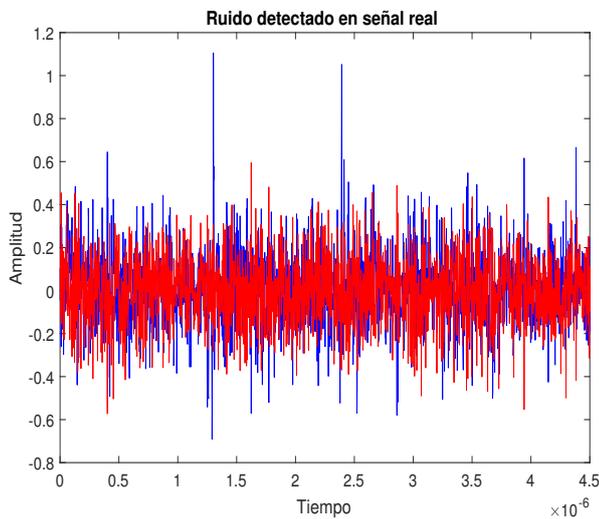


Figura 19: Error señal real.

Tabla 2: Comparación de errores.

	Error Cuadrático	MSE	RMSE
Señal simulada	0.0662	0.0558	0.2362
Señal Real	0.0283	0.0283	0.1682

6. Discusión y Conclusiones

En este trabajo se ha mostrado una aplicación de la Transformada de Hilbert Huang al análisis de señales obtenidas de un satélite. La HHT ha sido de bastante utilidad en la recuperación de la señal transmitida por el satélite, cuando esta contiene ruido (AWGN) dentro de un enlace de un sistema de comunicación. Los resultados muestran la capacidad de la HHT para eliminar el ruido y recuperar las componentes de utilidad. Para el caso de la señal simulada el error de recuperación fue del

5.6 % mientras que para la señal real fue del 2.8 %. Hasta donde los autores tienen conocimiento, el uso de la HHT para la reconstrucción o análisis de señales satelitales no se ha reportado en la literatura, y para lo que normalmente se ha utilizado es para el desarrollo de filtrado del canal de transmisión y/o recepción de la señal, estimación de parámetros de una señal FM, diseño de un ecualizador para el receptor y estimación de canal OFMD (por sus siglas de orthogonal frequency division multiplexing).

La HHT es un método adaptativo, esto significa que a medida que avanza la descomposición de la señal va ajustando sus parámetros. En las Figuras 8 y 9, es posible observar como al aumentar el orden de la IMF las oscilaciones van disminuyendo. La primera IMF representa las frecuencias más altas, en este caso corresponde a componentes de ruido. La descomposición termina cuando se tiene una señal monótonica. Al observar las Figuras 10 y 11, que corresponden a la representación de las frecuencias instantáneas, es posible apreciar que en las últimas IMF hay mayor claridad sobre las componentes frecuenciales detectadas. En el caso de las IMF de la señal simulada, desde la séptima descomposición es posible ver como la mezcla de modos ha desaparecido, en el caso de la señal este efecto es más evidente a partir de la IMF 6.

Las Figuras 18 y 19 permiten entender la utilidad de la HHT en la detección de ruido. El ruido añadido a la señal original, el cual es un problema típico de los sistemas de comunicación satelital, pudo ser detectado y de esta manera eliminado en la reconstrucción de la señal, este último detalle se puede ver en las Figuras 12 y 13. Aunque la reconstrucción de la señal presenta un error, es una interesante contribución poder recuperar la información original. El error detectado se puede disminuir al implementar alguno de los métodos antes mencionados para tratar el problema de mezcla de modos.

Al realizar la comparación de los resultados obtenidos con la HHT y la aplicación de la FFT, es conveniente mencionar que el espectro de Fourier permite observar una componente frecuencial alrededor de 0.4 GHz para la señal simulada, y 0.42 GHz para la señal real. La resolución del espectro de Fourier no permite detectar otras componentes frecuenciales que aparecen en el proceso de transmisión de la información, lo que si ocurre con la HHT y queda representado en las frecuencias instantáneas calculadas.

Finalmente, como medio de verificación, se ha obtenido la FFT de la señal transmitida y la señal recuperada para los datos reales y simulados, esto se observa en las Figuras 16 y 17 respectivamente. La FFT de los dos tipos de señales permite afirmar que la señal reconstruida es una adecuada aproximación de la señal originalmente enviada.

Los resultados del presente trabajo muestra que la HHT en los sistemas satelitales puede tener gran utilidad en la estimación de la señal transmitida permitiendo mantener la integridad de la información de los datos y reducir el efecto del ruido. Lo que mejora la recuperación y confiabilidad de la información de los datos y se abre un panorama de las posibles aplicaciones de la HHT dentro de los sistemas satelitales en los diferentes segmentos.

Agradecimientos

Este trabajo fue apoyado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) a través del programa de **Cátedras CONACyT** dentro del **proyecto 3066**, la **Universidad Autónoma de Zacatecas** y por **UNAM-PAPIIT IA104218**.

Referencias

- Boashash, B., Apr 1992. Estimating and interpreting the instantaneous frequency of a signal. Part 1: Fundamentals. *Proceedings of the IEEE* 80 (4), 520–538.
- Bueno-Lopez, M., Giraldo, E., Molinas, M., December 2017a. Analysis of neural activity from EEG data based on EMD frequency bands. In: 24th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS). Vol. 1. IEEE, Batumi, Georgia, pp. 401–405.
- Bueno-Lopez, M., Molinas, M., Kulia, G., September 2017b. Understanding instantaneous frequency detection: A discussion of Hilbert-Huang Transform versus Wavelet Transform. In: International Work-Conference on Time Series Analysis-ITISE. Vol. 1. University of Granada, Granada, Spain, pp. 474–486.
- Dowel, J. M. (Ed.), 2014. *The Cubesat Explosion*. Harvard, <http://planet4589.org/talks/cubesats/cube3.pdf>.
- E. Hari Krishna, M. Raghuram, K. V. M. K. S., Reddy, K. A., May 2012. Emd based ofdm channel estimation. *IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings*. DOI: 10.1109/I2MTC.2012.6229395
- Gasca Segura, M., Bueno-Lopez, M., Molinas, M., Fosso, O. B., April 2018. Time-frequency analysis for nonlinear and non-stationary signals using hht: A mode mixing separation technique. *IEEE Latin America Transactions* 16 (4), 1091–1098. DOI: 10.1109/TLA.2018.8362142
- Hao Chen, J.-h. G., Liu, T., December 2013. Fm signal parameter estimation using the hilbert huang transform. 6th International Congress on Image and Signal Processing (CISP). DOI: 10.1109/CISP.2013.6743863
- Hou, T. Y., Shi, Z., Sept 2013. Data-driven time-frequency analysis. *Applied and Computational Harmonic Analysis* 35 (2), 284–308.
- Huang, N. E., Shen, S. S. P. (Eds.), 2014. *Hilbert-Huang Transform and its Applications*. Vol. 16. Interdisciplinary Mathematical Sciences. DOI: <https://doi.org/10.1142/5862>
- Huang, N. E., Shen, Z., Long, S. R., Wu, M. C., Shih, H. H., Zheng, Q., Yen, N.-C., Tung, C. C., Liu, H. H., 1998. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 454 (1971), 903–995. DOI: 10.1098/rspa.1998.0193
- Huang Yuchun, Huang Zailu, H. B., Shuhua, X., September 2007. Integrated fft-based interpolation frequency estimator and its application to feature extraction of fm signal. *International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*. DOI: 10.1109/WICOM.2007.305
- Mandic, D. P., Rehman, N. U., Wu, Z., Huang, N. E., Nov 2013. Empirical mode decomposition-based time-frequency analysis of multivariate signals: The power of adaptive data analysis. *IEEE Signal Processing Magazine* 30 (6), 74–86.
- N.Padmaja, D. a., R.Swathi, September 2011. Signal processing of radar echoes using wavelets and hilbert huang transform. *Signal & Image Processing : An International Journal (SIPIJ)* 2 (3). DOI: 10.5121/sipij.2011.2310
- Radiometrix, 2010a. Manual: 500mw rf power amplifier module. [urlhttp://www.radiometrix.com/content/afs2-0](http://www.radiometrix.com/content/afs2-0).
- Radiometrix, 2010b. Manual:uhf narrow band fm multi channel transceiver. [urlhttps://www.radiometrix.com/node/187](http://www.radiometrix.com/node/187).
- Stone, T. (Ed.), 2004. *Technical Report NAS-04-009: Introduction to Satellite Communications Technology for NREN*. NASA, <https://www.nas.nasa.gov/assets/pdf/techreports/2004/nas-04-009.pdf>.
- Wang, X., Wang, Y., October 2013. A single-channel bss new method of time-frequency overlapped communication signal based on multi-scale cwt and ica. *International Conference on Computational Problem-Solving (ICCP)*. DOI: 10.1109/ICCP.2013.6893582
- Wu, Z., Huang, N. E. (Eds.), August 2009. *Ensemble Empirical Mode Decomposition: A Noise Assisted Data Analysis Method*. Vol. 1. World Scientific Publishing Company. DOI: <https://doi.org/10.1142/S1793536909000047>
- Xu, D., Xia, Y., Mandic, D. P., Feb 2016. Optimization in quaternion dynamic systems: Gradient, hessian, and learning algorithms. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems* 27 (2), 249–261.
- Yingjun Yuan, Zhitao Huang, H. W., Wang, X., 2013. Specific emitter identification based on hilbert–huang transform-based time–frequency–energy distribution features. *IET Communications* 8 (13), 2404–2412. DOI: 10.1049/iet-com.2013.0865
- Yu, W., Qian, X., November 2010. Some factors which affect the satellite communication. In: 2nd International Workshop on Database Technology and Applications. IEEE, Wuhan, China. DOI: 10.1109/DBTA.2010.5659067