

Trabajo Final

Comunicaciones Digitales

FCEFN - UNC

Alumno: Luciano Ariel Rodriguez

Supervisores: Graciela C. Briones, Martín Ayarde

I. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo se adentra en el funcionamiento de la modulación LoRa, con guía en base al paper de Lorenzo Evangelista [1]. Además, se realiza un estudio del preámbulo para desarrollar la optimización siguiendo el paper de Jae Mo Kang [2].

II. MODULACIÓN LORA

LoRa es una modulación de espectro expandido que usa una técnica de “chirridos” que consiste en modular el mensaje por medio de una señal que varía la frecuencia continua y linealmente.

A. Parámetros

- SF (Spreading Factor): representa cuánto se esparce la señal en el tiempo. Toma valores entre 7 - 12. También, el número de bits que se codifica en cada símbolo.
- T_s : Tiempo que tarda en enviarse un símbolo $\frac{2^{SF}}{BW}$
- Bw : Ancho de banda definido.
- T : Tiempo de muestra ($1/Bw$).
- s : Símbolo a transmitir ($0 \dots 2^{SF-1}$).

III. WAVEFORM

La forma de onda transmitida de duración T_s para cada símbolo $s(nT_s)$ es la siguiente:

$$c(nT_s + kT) = \frac{1}{\sqrt{2^{SF}}} e^{j2\pi[(s(nT_s)+k)_{mod} 2^{SF}] kT \frac{B}{2^{SF}}}$$
$$c(nT_s + kT) = \frac{1}{\sqrt{2^{SF}}} e^{j2\pi[(s(nT_s)+k)_{mod} 2^{SF}] \frac{k}{2^{SF}}}$$

donde k toma valores de 0 hasta $2^{SF} - 1$. Podemos observar que a medida que la frecuencia aumenta con k , cada waveform difiere de la waveform base con frecuencia inicial 0, con un cambio de frecuencia (frequency shift) $s(nT_s)$. El delta de frecuencia está dado por $\frac{Bw}{2^{SF}}$.

IV. DEMODULACIÓN ÓPTIMA

Para demodular la señal, se realiza la comparación del símbolo recibido por cada una de las funciones bases 2^{SF} . Esta comparación se hace mediante la correlación de las dos señales y se elige el símbolo que maximice lo siguiente:

$$\sum_{k=0}^{2^{SF}-1} r(nT_s + kT) \cdot c^*(nT_s + kT)$$

donde r es la señal recibida y c^* es el conjugado del chirrido base.

V. PREÁMBULO LORA

En LoRa las transmisiones suelen comenzar conociendo a priori un preámbulo, que es una secuencia conocida repetida N veces. Suponemos que h es el ruido del canal, y se plantea que la detección es un problema de hipótesis binaria tal que

$$\begin{cases} \mathcal{H}_0: & \mathbf{y}_n = \mathbf{w}_n \\ \mathcal{H}_1: & \mathbf{y}_n = \sqrt{\rho} h \mathbf{x} + \mathbf{w}_n \end{cases}, \quad n = 0, 1, \dots, N-1$$

V. ESQUEMA PROPUESTO

A. Detección de preámbulo basado en umbrales.

Para esta definición, es importante definir lo que se demodula para nuestra guía.

$$\mathbf{Y}_n = \mathbf{1}_M^T (\mathbf{x}^* \odot \mathbf{y}_n), \quad n = 0, 1, \dots, N-1$$

\mathbf{Y}_n es el resultado del proceso de “dechirping”, y como vemos, está representado como un vector, el cual contiene los símbolos demodulados. El paper, trabaja en un contexto en el cual la señal enviada es el preámbulo. N indica cuántas veces se repite el vector \mathbf{Y}_n , mientras que k es el número de chirridos base dentro de una sola repetición de preámbulo.

En resumen, supongamos que recibimos $\mathbf{Y}_n = (0, 0, 0, 0)$, $k = 4$ y N es el número que voy a detectar \mathbf{Y}_n . En nuestra simulación, la implementación del proceso de envío/recepción está dada para $k=4$, pero no está implementada la repetición de ello (N). Sin embargo, para nuestro caso de estudio podemos suponer un N fijo.

Una vez definido esto, el paper define que la presencia del preámbulo si:

$$\sum_{n=1}^N I(A_n(\gamma)) \geq k$$

donde la $I()$ es un indicador de función que es uno o cero dependiendo si su argumento es verdadero o falso.

$$A_n(\gamma) = \begin{cases} \text{Re}\{h^* Y_n\} \geq \gamma, & \text{coherent detection;} \\ |Y_n| \geq \gamma, & \text{non-coherent detection,} \end{cases}$$

Luego de esto se terminan de definir los dos umbrales a estudiar, y denota el umbral de detección del chirrido base, y k el umbral de número de veces que se detecta este chirrido.

B. Optimización de umbrales

Para la optimización, el paper plantea un estudio de probabilidades.

$$P_D(k, \gamma) = \sum_{i=k}^N \binom{N}{i} (p(\gamma))^i (1 - p(\gamma))^{N-i}$$

P_D representa la probabilidad de detectar correctamente el preámbulo cuando está presente. También evidencia

$$p(\gamma) = \begin{cases} Q\left(\sqrt{\frac{2}{|h|^2\rho\sigma^2}}\gamma - \sqrt{\frac{2|h|^2\rho}{\sigma^2}}\right), & \text{coherent detection;} \\ Q_1\left(\sqrt{\frac{2|h|^2\rho}{\sigma^2}}, \sqrt{\frac{2}{|h|^2\rho\sigma^2}}\gamma\right), & \text{non-coherent detection} \end{cases}$$

Además, el paper nos define la probabilidad de “falsa alarma”, es decir, la probabilidad de detectar erróneamente el preámbulo cuando está ausente

$$P_F(k, \gamma) = \sum_{i=k}^N \binom{N}{i} (q(\gamma))^i (1 - q(\gamma))^{N-i}$$

$$q(\gamma) = \begin{cases} Q\left(\sqrt{\frac{2}{|h|^2\rho\sigma^2}}\gamma\right), & \text{coherent detection;} \\ \exp\left(-\frac{\gamma^2}{|h|^2\rho\sigma^2}\right), & \text{non-coherent detection.} \end{cases}$$

El objetivo de nuestra referencia es maximizar P_D sujeto a P_F , para esto plantea un “problema” asociado:

$$\underset{1 \leq k \leq N, \gamma}{\text{maximize}} \quad P_D(k, \gamma) \quad \text{subject to} \quad P_F(k, \gamma) \leq \alpha$$

donde α es la máxima tolerancia para el rango de falsa alarma. Así, expresa como la mejor solución a este problema a lo siguiente:

$$k^* = \underset{1 \leq k \leq N}{\text{argmax}} \quad P_D(k, g(k, \alpha)),$$

$$\gamma^* = g(k^*, \alpha)$$

en ésta expresión aparece “g()” que es la inversa de la función P_F para un gamma relacionado con un cierto alfa, es decir, $g(k, \alpha)$ corresponde al valor de γ tal que $P_F(k, \gamma) = \alpha$.

Las simulaciones del paper, muestran el comportamiento de P_D con la variación de α .

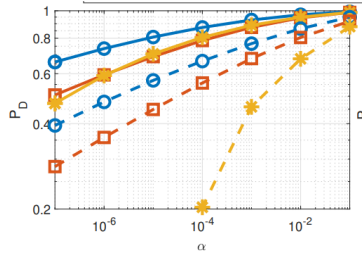


Fig. PD vs. Alpha original.

desde nuestra simplificación, queremos aproximarnos a esto.

V. SIMULACIONES

Como dijimos anteriormente, intentamos aproximarnos desde nuestro modelo de envío/recepción guiado por el paper de Lorenzo Evangelista [1].

Una de las diferencias, es que el ruido en la segunda referencia es multiplicativo, y luego de realizar varias pruebas, realizamos la implementación para ambos modelos (ruido aditivo y ruido multiplicativo).

Para esto partimos del modelo de envío de una señal cualquiera incluyendo su preámbulo fijo, con un tamaño de 4 muestras. Si bien la simulación realiza el envío de toda la señal, en el receptor nos quedamos solo con las primeras cuatro muestras para “asimilar” que el receptor está recibiendo la trama del preámbulo separado (Y_n).

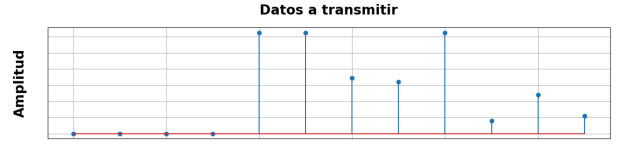


Fig. Símbolos a transmitir.

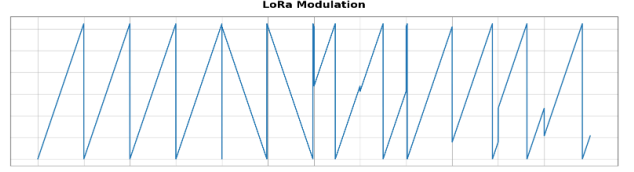


Fig. Señal modulada en frecuencia.

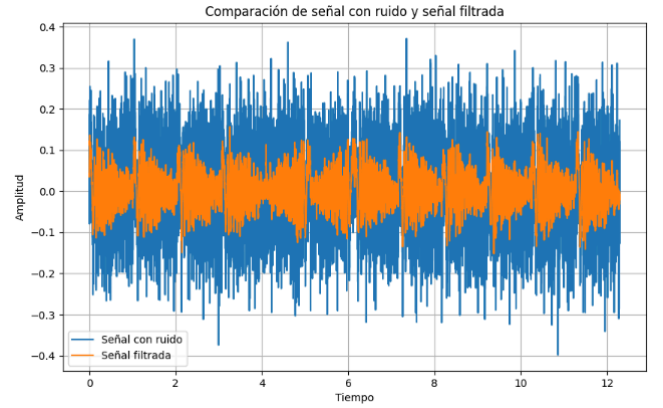


Fig. Recepción de la señal con ruido y filtrada.

Para filtrar la señal, que en este primer caso el ruido es multiplicativo, usamos un filtro de media móvil que es una técnica que funciona calculando promedios de puntos adyacentes desplazando una “ventana” a lo largo de la señal. La ventana encierra la cantidad de puntos a promediar en un paso.

Realizando la demodulación con la correlación, obtenemos la estimación de los símbolos, donde pudimos corroborar que la detección funciona con éste tipo de ruido y filtrado.

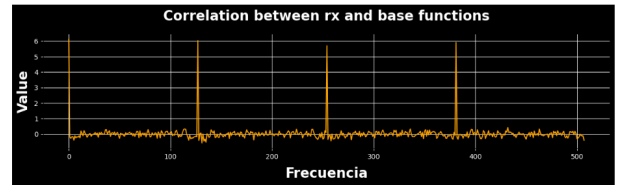


Fig. Correlación para la demodulación.

Luego, empezamos a ver qué obtenemos de la “optimización” de los umbrales k y γ para ésta señal. Para esto vale aclarar que el ruido es de media cero y varianza unitaria, por lo que para las aproximaciones de P_D y P_F , necesitamos el contexto de la señal que llega al receptor. Los demás valores son “reemplazables”, es decir llenar las claves con los valores, pero necesitamos hacer una aproximación para gamma en relación a la función “g()”, ya que los valores de la tolerancia van a ir variando y el otro valor con el que contamos va ser el de k . Para esto usamos la aproximación por búsqueda binaria o punto medio.

Los resultados de PD vs Alpha se ilustran a continuación

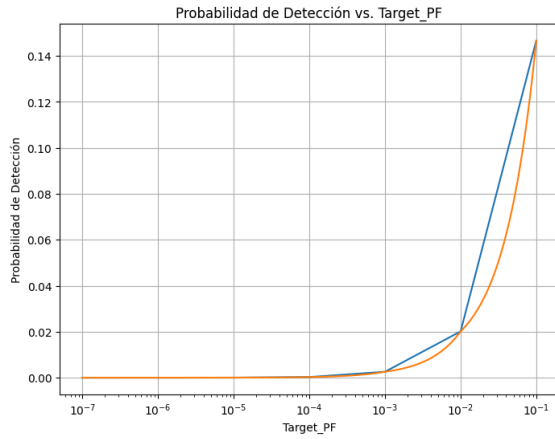


Fig. PD vs. Alpha con ruido multiplicativo.

alpha	kast	gammaast	PD	PF
1e-07	6	0.117174	5.25714e-07	9.99956e-08
1e-06	6	0.104669	4.5831e-06	1.00002e-06
1e-05	5	0.112602	3.76306e-05	1.00001e-05
0.0001	4	0.120408	0.000302004	0.000100003
0.001	4	0.101126	0.00258259	0.000999976
0.01	3	0.103282	0.020147	0.01
0.1	2	0.1	0.146637	0.0959243

Fig. Tabla de datos con ruido multiplicativo.

Sin realizar conclusiones aún, adjuntamos los resultados de las mismas aproximaciones pero para la señal con ruido aditivo

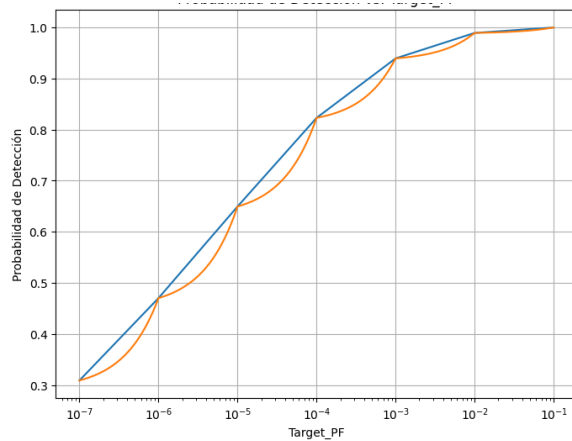


Fig. PD vs Alpha con ruido aditivo.

alpha	kast	gammaast	PD	PF
1e-07	6	1.75718	0.309044	9.99998e-08
1e-06	6	1.56965	0.470115	9.99999e-07
1e-05	6	1.3641	0.649304	1e-05
0.0001	5	1.45058	0.822731	0.0001
0.001	5	1.17796	0.939116	0.001
0.01	5	0.848654	0.988948	0.00999999
0.1	4	0.707886	0.999611	0.1

Fig. Tabla de datos con ruido aditivo.

VI. ESTUDIO DE RESULTADOS

Luego de las simulaciones observamos que en el caso del ruido implementado con la segunda referencia, se nos dificulta mucho la aproximación. Vale aclarar que el paper realiza simulaciones con canales pero a una escala de 10000 canales distintos, es decir muchísimas muestras. También es posible que nuestra dificultad sea el trato del canal con esta característica ya que a lo largo de la materia nos mantuvimos mayormente con el ruido aditivo.

Sin embargo, en nuestra segunda simulación la probabilidad se ve claramente maximizada mientras que la probabilidad de falsa alarma es muy baja en su comparación.

Creemos que la poca experiencia en cuánto al trabajo de las señales puede influir en estos resultados y seguramente sean mejorables ajustando parámetros de nuestra señal y su contexto.

De todas maneras, nos sentimos satisfechos con las aproximaciones realizadas.

V. CONCLUSIONES

A lo largo del trabajo, necesitamos interiorizarnos en muchos aspectos nuevos, y comparando el punto de inicio con el final, personalmente sentimos que el trabajo se aproxima a nuestro objetivo.

En cuánto a los resultados, nos quedó un sistema que nos permite definir un k y γ optimizados para nuestro receptor, sabiendo la potencia de la señal y su relación con el ruido, lo que abre una ventana inmensa de estudio de casos de uso.

También se pueden realizar mejoras significativas, incluso simulaciones de mayor magnitud para estudiar más a detalle los parámetros y cómo varían en cada contexto de las señales y los receptores.

REFERENCIAS

- [1] Frequency Shift Chirp Modulation: The LoRa Modulation Lorenzo Vangelista, Member, IEEE
- [2] LoRa Preamble Detection with Optimized Thresholds Jae-Mo Kang, Member, IEEE.
- [3] Repositorio neon-it
https://github.com/neon-iot/communication_labs
- [4] https://www.youtube.com/watch?v=jHWepP1ZWtk&t=1336s&ab_channel=VisualElectric
- [5] <http://www.sghosly.com/p/lora-is-chirp-spread-spectrum.html>
- [6] <https://www.sghosly.com/p/lora-is-chirp-spread-spectrum.html>

POSIBLES MEJORAS

- Agregar calidad al código.
- Estudios vs SNR.
- Análisis caso semi-real (vía SPLAT ó radio Mobile).}

