

Sistema de seguridad basado en la retrodispersión de señales LoRa

Marc Lázaro⁽¹⁾, Antonio Lázaro⁽¹⁾, Ramon Villarino⁽¹⁾, David Girbau⁽¹⁾

marc.lazaro; antonioramon.lazaro; ramon.villarino; david.girbau@urv.cat

⁽¹⁾Dept. d'Enginyeria Elèctrica, Electrònica i Automàtica (DEEEA)

Universitat Rovira i Virgili, Av. Paisos Catalans, 43007 Tarragona

Resumen—El sistema expuesto en este trabajo propone un cambio de paradigma en la tecnología utilizada comercialmente en la implementación de sistemas de seguridad inalámbricos. La principal diferencia radica en el uso de técnicas de retrodispersión juntamente con señales de espectro ensanchado. Este cambio de tecnología permite reducir por debajo del miliamperio el consumo de los nodos inalámbricos, lo que permite prescindir de las baterías, y consecuentemente, eliminar el mantenimiento periódico necesario de los sistemas comerciales. Esta comunicación aborda los diferentes retos y soluciones para la implementación del sistema (protocolo de comunicación, implementación del hardware, etc.), centrándose principalmente en el diseño del sensor inalámbrico.

I. INTRODUCCIÓN

La técnica de retrodispersión de campos electromagnéticos es la base de tecnologías como el RFID o el Radar. Durante muchos años esta técnica ha estado estigmatizada en comunicaciones inalámbricas de corto alcance. El crecimiento exponencial en el número de dispositivos conectados en el campo del internet de las cosas (IoT) está forzando un cambio de paradigma en los front-ends de radiofrecuencia, los cuales no pueden cumplir con los requisitos de bajo consumo de la próxima generación de dispositivos IoT. Llegados a este punto, la técnica de retrodispersión parece ser una solución prometedora al anterior problema. En la última década, varios trabajos se han orientado al estudio de cada uno de los retos de las comunicaciones por retrodispersión: modulación [1], rango [2], interoperabilidad [3], robustez [4] [5], velocidad de comunicación [6], y escalabilidad [7], entre otros, demostrando la viabilidad de esta técnica para comunicaciones de largo alcance y alto rendimiento.

Con el avance de la tecnología, la domótica ya no es un privilegio al alcance de unos pocos. Hoy en día, se comercializan sistemas de seguridad del hogar compatibles con las principales tecnologías inalámbricas y asistentes de voz (WiFi, Bluetooth, ZigBee, Tuya, Alexa, Siri, Google Assistant, etc.). Estos sistemas han ganado mucho interés, pues no requieren ni conocimiento previo para su instalación ni una cuota de mantenimiento mensual, como si sucede con los sistemas de seguridad gestionados por terceras compañías. Entre estos sistemas se pueden encontrar los cableados y los inalámbricos, siendo los segundos los más utilizados debido a su fácil instalación. Éstos están formados por una centralita y un conjunto de sensores instalados en los diferentes puntos de monitorización. El principal inconveniente es que los sensores inalámbricos requieren de un mantenimiento periódico, dando esto paso al objeto de esta investigación: eliminar las baterías de los sensores inalámbricos. Para ello se propone un sistema de seguridad basado en la retrodispersión de señales LoRa,

reemplazando el típico front-end de los transmisores heterodinos (amplificador de potencia (PA), oscilador local (LO), mezclador, filtro, etc.) por un front-end de retrodispersión, reduciendo el consumo del transmisor en más de un orden de magnitud.

La comunicación se estructura de la siguiente manera: la sección II detalla el funcionamiento general del sistema de seguridad, la sección III se centra en el diseño e implementación del sensor inalámbrico, y finalmente, se termina con las conclusiones y trabajo futuro en la sección IV y V, respectivamente.

II. FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA

Los sistemas de vigilancia comerciales pueden operar en diversas bandas de frecuencia, comprendidas entre 300 MHz y 2.4 GHz, dependiendo del país o región. Aunque algunas empresas utilizan bandas, modulaciones y protocolos privados, hay una tendencia predominante hacia la estandarización a 433 MHz, debido a su equilibrio entre atenuación y rendimiento, así como al uso de modulaciones de amplitud. Modulaciones bien asentadas, como la ASK (Amplitude Shift Keying) o la OOK (On-Off Keying), reducen la complejidad del transceptor y, por ende, el coste de implementación. Sin embargo, es importante tener en cuenta que la modulación de amplitud es susceptible al ruido e interferencias, lo cual puede parecer contraproducente cuando se aplica a sistemas de seguridad.

El sistema de seguridad propuesto en este trabajo utiliza señales de espectro ensanchado LoRa en lugar de la típica modulación de amplitud, lo que proporciona ciertas ventajas al sistema. La tecnología LoRa utiliza una modulación CSS (Chirp Spread Spectrum), la cual introduce una ganancia de procesamiento que permite incrementar el rango de comunicación, compensando así las pérdidas de doble ruta causadas por la técnica de retrodispersión [8]. Además, esta modulación es inherentemente robusta frente a interferencias de banda estrecha y multipath, convirtiéndola en una opción idónea para esta aplicación.

El sistema propuesto consta de, como mínimo, dos receptores LoRa, uno en transmisión y otro en recepción, y un conjunto de sensores inalámbricos, tal y como se muestra en la figura 1. El transmisor envía paquetes constantemente a una frecuencia central f_{tx} , mientras que el receptor se mantiene a la escucha en uno de los canales adyacentes $f_{rx} = f_{tx} \pm 300kHz$. Los 300 kHz de separación quedan fijados por la frecuencia de modulación del sensor inalámbrico. No existe comunicación directa entre el transmisor y el receptor. La separación entre el canal central y los canales adyacentes

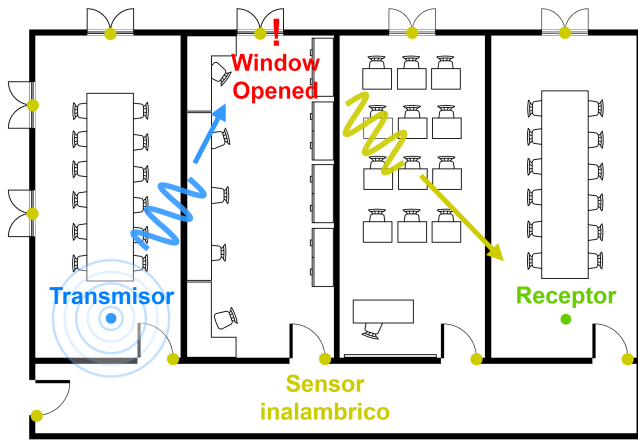


Fig. 1. Diagrama ilustrativo de la instalación y funcionamiento del sistema de seguridad propuesto en este trabajo.

se puede ajustar en función del ancho de banda de los paquetes LoRa. Cuanto mayor sea el ancho de banda, mayor deberá ser la separación entre el canal central y el adyacente, evitando así la interferencia del paquete transmitido sobre el reflejado. Cuando algunos de los sensores inalámbricos se activan, éstos reflejan las señales del transmisor a los canales adyacentes por medio de la retrodispersión, donde el receptor está escuchando. Si el receptor detecta un paquete, activa la alarma e indica que sensor envió la alerta. Opcionalmente, en función del entorno, se pueden añadir tanto transmisores, para aumentar la cobertura de los sensores lejanos, como receptores sintonizados en ambas bandas adyacentes, dificultando la tarea de inhabilitar el sistema por medio de interferencias premeditadas.

Existen varios protocolos de comunicación utilizados en comunicaciones por retrodispersión [9]. A diferencia de otras aplicaciones, donde la velocidad de transmisión es importante, los requisitos de esta aplicación son asegurar un tiempo de respuesta bajo y evitar la pérdida de paquetes. Para ello, se propone una modulación completamente analógica aprovechando una funcionalidad integrada en los transceptores LoRa comerciales: la detección de la desviación de frecuencia del paquete recibido. Cada sensor inalámbrico refleja los paquetes LoRa introduciendo una desviación única y conocida en la frecuencia central del paquete (e.g. Frecuencia de transmisión del sensor 1, sensor 2 y sensor 3, respectivamente: 433.295 MHz, 433.300 MHz y 433.305 MHz). Cuando el receptor recibe un paquete, puede determinar su procedencia en función de la desviación, en hercios, respecto a la frecuencia central del canal. La figura 2 muestra el espectro de frecuencia para cinco sensores diferentes, cada uno separado 5 kHz del adyacente para poder diferenciarlos con claridad. La modulación propuesta presenta dos ventajas importantes: se puede implementar con transceptores LoRa comerciales sin ningún tipo de modificación, y permite a todos los sensores inalámbricos transmitir en el mismo canal, reduciendo el número de receptores y el espectro utilizado.

Los receptores LoRa pueden demodular paquetes con una desviación de frecuencia igual al 25 % del ancho de banda del paquete [10]. Los paquetes LoRa integran un preámbulo (tren de chirps ascendentes) que permite al receptor determinar

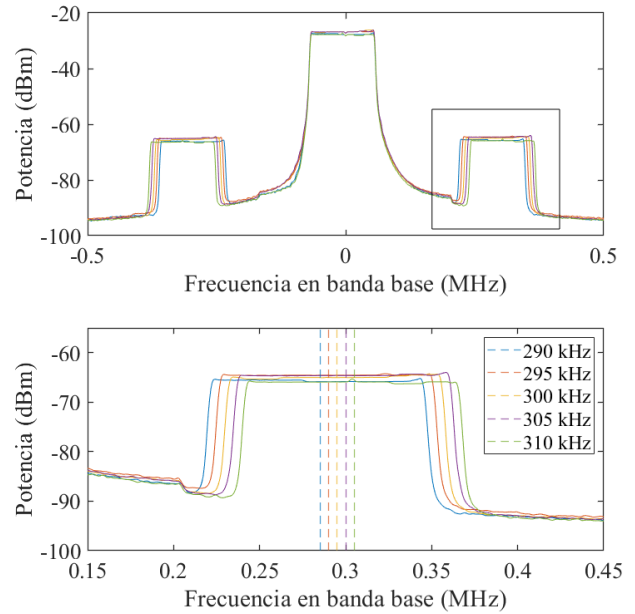


Fig. 2. Medida de retrodispersión de paquetes LoRa introduciendo un error de frecuencia única y conocida para cinco sensores diferentes: 290 kHz, 295 kHz, 300 kHz, 305 kHz y 310 kHz.

el tiempo de llegada del paquete. Para ello, se realiza una correlación entre la señal recibida y un tren de chirps ascendentes idéntico al del preámbulo. En este proceso también se determina la desviación en frecuencia del paquete recibido. Gracias a la capacidad del receptor de compensar tanto el tiempo de llegada como la frecuencia del paquete, muchos transceptores LoRa integran osciladores de baja precisión, los cuales suelen verse considerablemente afectados por factores como la temperatura, lo que supone un problema para el proceso de modulación analógica descrito en este trabajo. Para tratar este problema se puede sustituir el oscilador de cristal (XTAL) por un oscilador compensado por temperatura (TCXO). Todos los transceptores LoRa SX127x de Semtech, compañía propietaria de la modulación LoRa, requieren esta modificación, sin embargo, la nueva familia de transceptores SX126x ya integran un TCXO. La figura 3 muestra la desviación en frecuencia de ambas familias de transceptores (SX127x & SX126x). La medida se ha realizado con dos pares de transceptores de cada familia, sometiendo a uno de ellos a los cambios de temperatura del exterior. Las medidas muestran una desviación de frecuencia de 977 y 52 hercios, para los transceptores SX1276 y SX1262, respectivamente.

Los transceptores LoRa admiten varias configuraciones para flexibilizar el compromiso entre el alcance y la velocidad de la comunicación. Para esta aplicación se ha elegido una configuración estándar, con un ancho de banda (BW) de 125 kHz y un factor de dispersión (SF) de 12. Sin embargo, en función del entorno, se puede reducir el BW para incrementar el alcance en la comunicación, o reducir el SF para incrementar la velocidad de comunicación, y viceversa. Con esta configuración, el receptor admite una desviación de frecuencia en el paquete demodulado de 31.25 kHz. Considerando la medida de la desviación de frecuencia, de

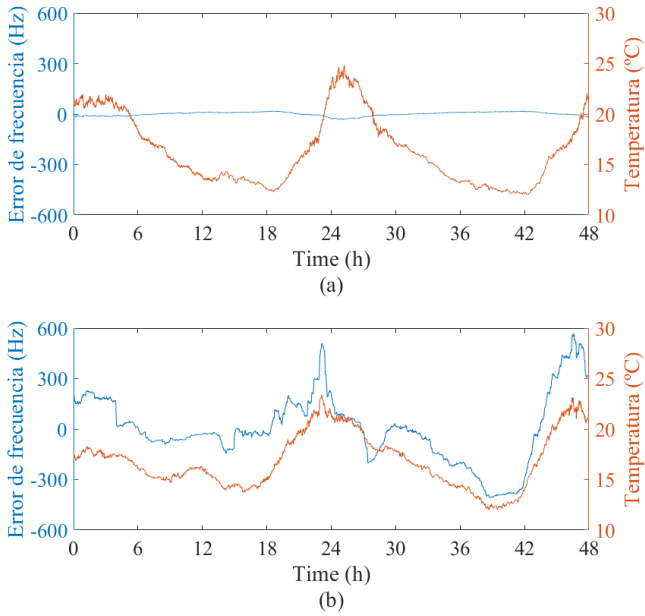


Fig. 3. Desviación de la frecuencia del oscilador en función de la temperatura para dos familias de transceptores LoRa: Sx126x (a) y SX127x (b).

$\pm 26 \text{ Hz}$, e introduciendo un margen de error (e.g. 75 Hz extras), utilizando la configuración mencionada, el sistema sería capaz de integrar un máximo de 315 sensores.

III. DISEÑO DEL SENSOR INALÁMBRICO

El sensor inalámbrico se ha diseñado para poder operar indefinidamente sin ningún tipo de mantenimiento. La figura 4 muestra el esquemático del sensor inalámbrico. El prototipo del sensor consta de 4 partes principales: el amplificador de reflexión, el modulador de fase, la unidad de control y la unidad de recolección y gestión de energía.

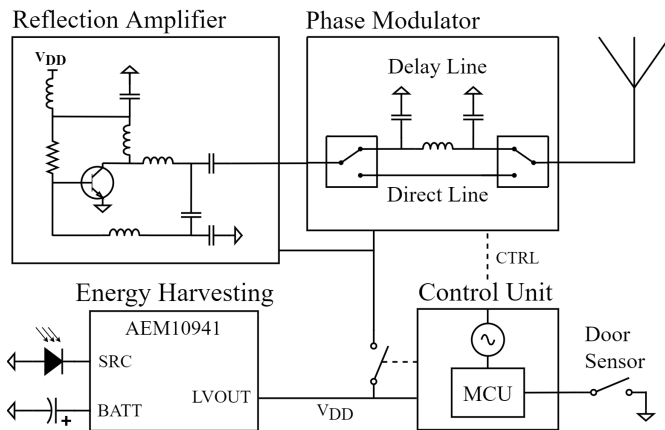


Fig. 4. Esquemático del sensor inalámbrico.

A. Amplificador de reflexión

A pesar de los resultados excepcionales reportados en la literatura académica en cuanto a alcance de comunicación en sistemas de retrodispersión LoRa (2.2 Km en [2]), en algunos entornos y configuraciones, el alcance puede diferir bastante de esas cifras. Teniendo esto en mente, se ha diseñado

un amplificador de reflexión para incrementar el alcance del sistema cuando sea necesario. El amplificador de reflexión se ha diseñado siguiendo una topología derivada del oscilador Colpitts. Sin embargo, cualquier topología utilizada en el diseño de osciladores se puede emplear para diseñar un amplificador de reflexión, siendo necesario únicamente reajustar el punto de operación. El elemento activo empleado en el diseño del amplificador de reflexión es un transistor bipolar de Si (SIEGET) de Infineon, aunque también se pueden utilizar otros elementos activos como mosfets, diodos túnel o amplificadores operacionales, considerando estos últimos como última opción, puesto que son más ruidosos que los transistores. Recientemente, los diodos túnel han ganado mucho interés para el diseño de amplificadores de reflexión debido a su sobresaliente eficiencia [11]. Sin embargo, a pesar de su gran potencial, su punto de polarización y consumo de corriente dificulta su integración con elementos discretos, pues requiere de un convertidor que reduce la eficiencia general del sistema. Adicionalmente, debido a su desuso en aplicaciones comerciales, actualmente es un dispositivo difícil de adquirir y bastante más costoso que el transistor utilizado en este trabajo (0,478 €). La figura 5 muestra la ganancia del amplificador de reflexión diseñado con un transistor BFP405 de Infineon utilizando la topología descrita en la figura 4. Se ha obtenido una ganancia máxima de 19.2 dB a una frecuencia de 431 MHz para un consumo de $324 \mu\text{W}$ (1.8V & $180 \mu\text{A}$). El ancho de banda del amplificador, determinado a -3 dB del máximo, es de 12.35 MHz , aproximadamente.

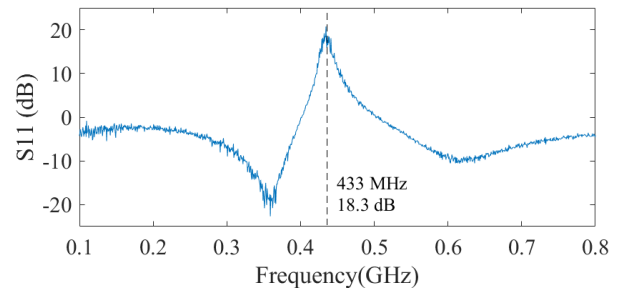


Fig. 5. Ganancia del amplificador de reflexión en función de la frecuencia.

B. Modulador de fase

Para implementar un front-end de retrodispersión solo es necesario modular la impedancia de terminación de la antena entre dos o más estados. Por ejemplo, encendiendo y apagando el amplificador a una frecuencia de 300 kHz ya se reflejarían los paquetes incidentes en los canales adyacentes ($\pm 300 \text{ kHz}$). Sin embargo, para maximizar la potencia dispersada se deben generar dos coeficientes de reflexión desfasados 180 grados, tal y como se justifica matemáticamente en [12]. Para tal fin, se utiliza un modulador de fase basado en elementos discretos, permitiendo generar estos dos estados, aprovechando así la ganancia del amplificador. El modulador de fase se ha implementado utilizando dos interruptores de doble salida (SPDT) ADG918 de Analog Devices y una red de retardo de 90 grados implementada con elementos discretos utilizando una red en pi. La señal queda desfasada 180 grados al pasar dos veces por el modulador. La figura 6 muestra las pérdidas de inserción y la fase para ambos estados del modulador. Se puede observar

un desfase de 85° entre los dos estados, y unas pérdidas de inserción promedio de 2.72 dB .

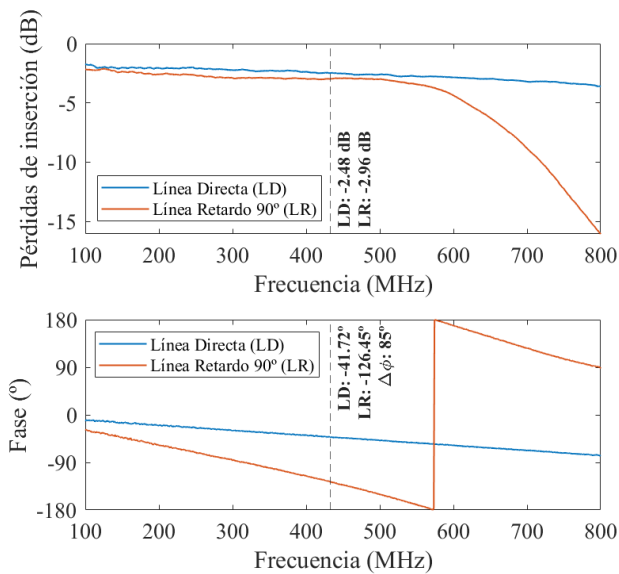


Fig. 6. Fase y pérdidas de inserción para los dos estados del modulador.

C. Unidad de Control

La unidad de control integra un microcontrolador de 8 bits (AtTiny402) y un oscilador de bajo consumo (LTC6906). El microcontrolador por sí solo puede generar la señal de control del modulador, sin embargo, resulta más eficiente utilizar un oscilador externo y reducir la frecuencia de reloj del microcontrolador a 32 kHz , limitando su función a gestionar las alimentaciones del amplificador y del modulador, en función del estado del sensor. Cuando el sensor de apertura se activa, el microcontrolador se despierta y activa las alimentaciones durante 10 segundos, reflejando los paquetes LoRa incidentes. El oscilador se ha configurado mediante una resistencia a una frecuencia fija y única entre los diferentes sensores inalámbricos.

D. Recolección de Energía

Toda la energía del sensor inalámbrico es recolectada y gestionada por el integrado AEM10941. Este chip sobresale por su circuito de arranque en frío, capaz de recolectar energía a partir de una potencia de tan solo $3 \mu\text{W}$. Además, este integrado dispone de un regulador LDO que proporciona una salida configurable entre 1.8 V y 4.1 V . La energía recolectada se ha almacenado en un supercondensador prismático de 220 mF de la marca CAP-XX. Este condensador dispone de una corriente de fuga de tan solo $5 \mu\text{A}$. Para la prueba de concepto se ha utilizado una placa solar flexible LL200-2.4-37 de $50 \times 35 \text{ mm}$ capaz de proporcionar 0.068 mW con tan solo 200 lux , ideal para entornos interiores.

IV. TRABAJO FUTURO

El trabajo futuro incluye la integración completa del sensor inalámbrico, así como el estudio en profundidad del comportamiento del sistema frente a diferentes escenarios, como por ejemplo zonas urbanas, naves industriales, residencias, oficinas, etc. También se prevé validar experimentalmente el

número máximo de sensores que el sistema puede abarcar, rango máximo de comunicación, el comportamiento ante interferencias, tanto inherentes en el ambiente como premeditadas, y el comportamiento a largo plazo del sensor inalámbrico.

V. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha propuesto el diseño de un sistema de seguridad completo basado en la retrodispersión de paquetes LoRa, empleando una modulación completamente analógica. Se presenta una prueba de concepto donde se ha diseñado y validado un prototipo operando en la banda de 433 MHz . El sistema propuesto ofrece ciertas ventajas sobre los sistemas comerciales. El consumo de los sensores inalámbricos se ha reducido en más de un orden de magnitud, lo que permite reemplazar las baterías por supercondensadores junto con un sistema de recolección de energía, eliminando así el mantenimiento periódico que precisan los sistemas comerciales. Se ha sustituido la modulación de amplitud por una modulación de espectro ensanchado (LoRa), lo que mejora la robustez del sistema frente a interferencias de banda estrecha y multipath.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por los proyectos PID2021-122399OB-I00 y PRE2019-089028 financiados por MICIU/AEI /10.13039/501100011033 y por FEDER, UE

REFERENCIAS

- [1] F. Rezaei, D. Galappaththige, C. Tellambura, and S. Herath, "Coding techniques for backscatter communications: A contemporary survey," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 25, no. 2, pp. 1020–1058, 2023.
- [2] J. Jiang, Z. Xu, F. Dang, and J. Wang, "Long-range ambient lora backscatter with parallel decoding," in *Proceedings of the 27th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, 2021, pp. 684–696.
- [3] S.-K. Kuo, M. Dunna, H. Lu, A. Agarwal, D. Bharadia, and P. P. Mercier, "An lte-powered ble-to-wifi backscattering chip towards single device interrogation rfid-like systems," *IEEE Solid-State Circuits Letters*, 2023.
- [4] S. G. Hong, Y. M. Hwang, S. Y. Lee, Y. Shin, D. I. Kim, and J. Y. Kim, "Game-theoretic modeling of backscatter wireless sensor networks under smart interference," *IEEE Communications Letters*, vol. 22, no. 4, pp. 804–807, 2017.
- [5] W. Liu, K. Huang, X. Zhou, and S. Durrani, "Full-duplex backscatter interference networks based on time-hopping spread spectrum," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 16, no. 7, pp. 4361–4377, 2017.
- [6] X. Wen, S. Bi, X. Lin, L. Yuan, and J. Wang, "Throughput maximization for ambient backscatter communication: A reinforcement learning approach," in *2019 IEEE 3rd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC)*. IEEE, 2019, pp. 997–1003.
- [7] M. U. Sheikh, B. Xie, K. Ruttik, H. Yiğitler, R. Jäntti, and J. Hämäläinen, "Ultra-low-power wide range backscatter communication using cellular generated carrier," *Sensors*, vol. 21, no. 8, p. 2663, 2021.
- [8] Semtech Corporation, "Semtech Application Note AN1200.22, LoRa Modulation Basics." Semtech Corporation, Tech. Rep., 05 2015.
- [9] F. Rezaei, D. Galappaththige, C. Tellambura, and S. Herath, "Coding techniques for backscatter communications-a contemporary survey," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2023.
- [10] Semtech Corporation, "Semtech Application Note AN1200.14, LoRa Modulation Crystal Oscillator Guidance," Semtech Corporation, Tech. Rep., 07 2017.
- [11] J. Hu, L. Zhong, T. Ma, Z. Ding, and Z. Xu, "Long-range fm backscatter tag with tunnel diode," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 32, no. 1, pp. 92–95, 2021.
- [12] P. V. Nikitin, K. Rao, and R. D. Martinez, "Differential rcs of rfid tag," *Electronics letters*, vol. 43, no. 8, p. 1, 2007.