

Sistema de lectura para espectroscopía de bioimpedancia

Juan David Salazar Cardona^{1,2}, Belén Calvo¹, María Teresa Sanz Pascual²

¹Grupo de Electrónica de Potencia y Microelectrónica (GEPM)
Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón (I3A)
Universidad de Zaragoza, Mariano Esquillor s/n, 50018, Zaragoza, Spain.
Tel. +34-976762707, e-mail: jdsc@unizar.es

²Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE)

Resumen

En este trabajo se presenta el funcionamiento de un sistema de lectura para espectroscopía de bioimpedancia (BioZ) para análisis de composición corporal, basado en una estructura de demodulación polar para establecer la magnitud y fase de la BioZ de manera independiente, previsto para circuitos integrados monolíticos Lab-on-a-Chip en tecnología CMOS.

Introducción

Actualmente, los sistemas portátiles de monitoreo de la salud brindan a las personas acceso directo a los datos sobre sus signos vitales, composición corporal, calidad del sueño, etc., promoviendo la prevención y/o detección temprana de anomalías en el mecanismo normal del organismo.

La espectroscopía de impedancia eléctrica (EIS) es una técnica utilizada para analizar las propiedades eléctricas, químicas y/o biológicas de materiales al excitar mediante una señal eléctrica alterna (corriente o voltaje) a distintas frecuencias y medir la señal resultante (voltaje o corriente). Aplicada al análisis de bioimpedancias (BioZ), recibe el nombre de espectroscopía de bioimpedancia (BIS), de uso en la evaluación de composición corporal, aplicación clave para valorar el estado nutricional y en la que se centra este trabajo.

Los sistemas BIS emplean típicamente inyección en corriente y medición en voltaje, para evitar lastimar o destruir muestras biológicas, como el tejido humano. La máxima amplitud de la corriente para mantener un límite seguro depende de la frecuencia: 1μA para frecuencias hasta 1kHz, y restringida a 100μA para frecuencias superiores a 100kHz [1].

Modelo de la BioZ

El tejido actúa como una impedancia, caracterizada mediante distintos modelos, entre ellos, el modelo de Fricke-Morse [2]:

$$Z(s) = R_{\infty} + \frac{R_0 - R_{\infty}}{1 + \tau s} \quad (1)$$

donde $R_0 = R_E$, $R_{\infty} = R_I || R_E$ y $\tau = (R_I + R_E) \cdot C_m$, siendo R_I y R_E las resistencias de los líquidos intracelular (ICW) y extracelular (ECW), respectivamente, y C_m la capacitancia de la membrana celular. El estudio [3] presenta valores de referencia para estos elementos de la BioZ en la estimación de masa celular corporal (BCM) en personas saludables. Así, se consideran los valores $R_E = 604\Omega$, $R_I = 1163\Omega$ y $C_m = 2.2nF$.

Sistema para medir la BioZ

Existen dispositivos comerciales para estimar la BioZ para análisis de composición corporal, brindando una caracterización fiel en el rango de frecuencia de trabajo, desde 1kHz hasta 1MHz, pero a expensas de un gran tamaño, elevado costo y manipulación restringida a especialistas. En consecuencia, es un reto desarrollar alternativas integradas Lab-on-a-Chip que sean fiables, seguras, económicas y portátiles.

Entre las principales técnicas para medición de impedancia se encuentra la demodulación polar, que corrige los errores de sincronización asociados a la estructura convencional de demodulación en cuadratura, al incorporar una resistencia de referencia en serie con la impedancia, mejorando la precisión en la recuperación con una arquitectura más robusta ante asincronías y retardos, con un menor consumo de área y potencia. Centrándonos en esta aproximación, el presente trabajo muestra el funcionamiento a nivel sistema de una estructura de demodulación polar, ilustrada en la Figura 1.

El sistema utiliza la detección sensible a fase para la medición de la magnitud de la BioZ. En esencia, consiste en multiplicar la señal de interés $V_s(t)$, proveniente de amplificar la caída de tensión en la impedancia $V_{zx}(t)$ mediante un amplificador de instrumentación (IA), con una señal de referencia en

cuadrada $V_r(t)$, garantizando que $\omega_s = \omega_r = \omega$ y $\theta_s = \theta_r = \theta$, para generar una señal rectificada de onda completa $V_{psd}(t)$ a la salida del multiplicador o detector sensible a fase (PSD). Un filtro pasa bajas (LPF) elimina las componentes frecuenciales de orden superior, recuperando exclusivamente el nivel DC a la salida $V_{out,DC}$ (Figura 2), proporcional a la magnitud de la BioZ de acuerdo a:

$$|Z_x| = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{V_{out,DC}}{G_{IA} \cdot V_r \cdot i} \quad (2)$$

La fase de la impedancia se recupera utilizando una compuerta XOR, cuya salida genera un tren de pulsos con un ancho de pulso (Δ_t) proporcional a la fase de la BioZ:

$$\theta = 360^\circ \cdot \Delta_t \cdot f \quad (3)$$

Resultados

La Tabla 1 muestra los datos para la estimación de la BioZ en el rango de caracterización para la aplicación de análisis de composición corporal, desde 1kHz hasta 1MHz, manteniendo la corriente de excitación en valores seguros, para $R_{REF} = 500\Omega$, considerando componentes ideales. Un análisis de las especificaciones del sistema para conseguir errores menores a 1% para la magnitud y 1° para la fase requiere una ganancia mínima de 100 (40 dB) con un

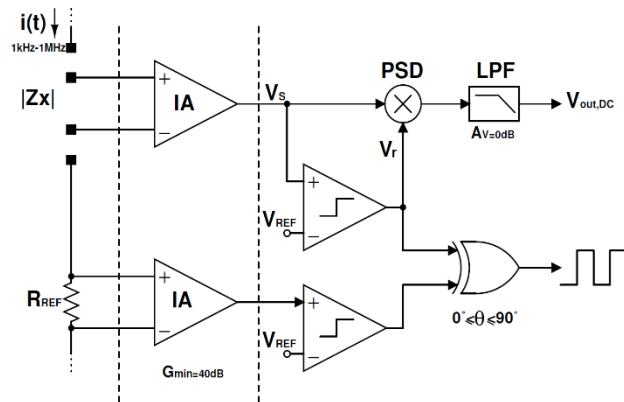


Figura 1. Sistema de demodulación polar para BIS

ancho de banda $f_{BW} = 10f_{IN,max}$ para los IAs, una frecuencia de corte menor a 100Hz para el LPF y un retardo máximo de los comparadores de 6.95ns.

Conclusiones

Este trabajo presenta un estudio preliminar de especificaciones para el diseño de un sistema de demodulación polar para BIS con errores menores a 1% y 1° en la recuperación de la magnitud y fase para su futura integración en tecnología CMOS para obtener un sistema portátil con altas prestaciones, principalmente una alta precisión con un consumo de potencia reducido.

REFERENCIAS

- [1]. Safe Current Limits for Electromedical Apparatus: Association for the Advancement of Medical Instrumentation, document ANSI/AAMI ES1, 1993. American National Standard.
- [2]. D. Naranjo, J. Reina and M. Min. Fundamentals, Recent Advances, and Future Challenges in Bioimpedance Devices for Healthcare Applications. *Journal of Sensors*. 2019, 9210258, 1-42. Available from: <https://doi.org/10.1155/2019/9210258>.
- [3]. A. De Lorenzo, A. Andreoli, J. Matthie, and P. Withers. Predicting body cell mass with bioimpedance by using theoretical methods: a technological review. *J. Appl. Physiol.* 1997, 82(5), 1542–1558. Available from: <https://doi.org/10.1152/jappl.1997.82.5.1542>.

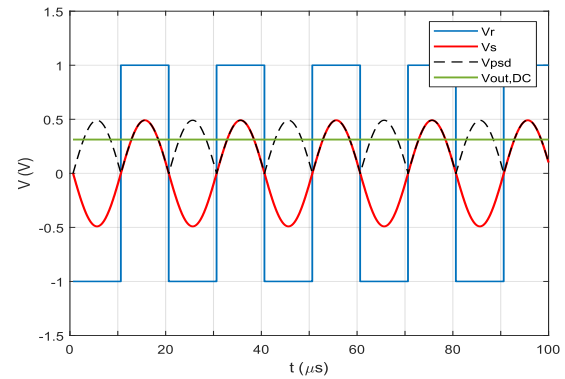


Figura 2. Detección sensible a fase a 50kHz

Tabla 1. Datos de la medición de BioZ

f (kHz)	i (μA)	G_{IA}	V_{Zx} (mV)	$V_{out,DC}$ (mV)	$ Z_x $ teo. (Ω)	$ Z_x $ sim. (Ω)	$e_{ Z_x }$ (%)	θ teo. ($^\circ$)	θ sim. ($^\circ$)	e_θ ($^\circ$)
1	1	100	0.6	38.44	603.9	603.8	0.01	-0.47	-0.46	0.01
50	10	100	4.9	312.45	490.9	490.8	0.02	-11.90	-11.87	0.03
1000	10	100	4.0	253.40	397.9	398.0	0.02	-1.20	-1.15	0.05