

# Fantoma multicanal de dipolos magnéticos orientables para magnetoencefalografía

C. Sánchez López de Pablo<sup>1,2,3</sup>, J.J. Serrano Olmedo<sup>1,2,3</sup>, F. del Pozo Guerrero<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>Grupo de Bioingeniería y Telemedicina (GBT), Centro de Tecnología Biomédica (CTB), Universidad Politécnica de Madrid (UPM), Madrid, España, {csanchez, fpozo}@gbt.tfo.upm.es, jjserran@etsit.upm.es

<sup>2</sup>Centro de Investigación Biomédica en Red de Bioingeniería, Biomateriales y Nanomedicina, Madrid, España

<sup>3</sup>Programa MADR.IB-CM de Biociencias de la Comunidad de Madrid, Madrid, España

## Resumen

La magnetoencefalografía (MEG) es una técnica de neuroimagen funcional que permite investigar y describir los patrones espacio-temporales de la actividad cerebral relacionada con diferentes procesos cognitivos básicos mediante la captación de campos magnéticos [1]. Para contribuir con estas investigaciones y para poder llevar a cabo estudios acerca de técnicas de interpretación de esta actividad cerebral, se ha desarrollado un fantoma multicanal de dipolos magnéticos orientables para MEG. En este artículo se presentan los principios teóricos seguidos en el diseño del prototipo, el proceso de implementación del mismo y las funcionalidades asociadas al sistema.

## 1. Introducción

La magnetoencefalografía es una prueba que actualmente está en expansión en todo el mundo. Las dificultades que surgen asociadas a la interpretación de las señales cerebrales, están siendo reducidas gracias a numerosos trabajos científicos [2] [3] [4]. Sin embargo, existe una acusada insuficiencia de medios materiales para testar los modelos teóricos que ayudan a la interpretación de las señales magnetoencefalográficas, en particular los denominados “modelos de sincronización” [5].

Dichos modelos necesitan disponer de un sistema que sea capaz de generar en distintos canales asociados, campos magnéticos similares (en magnitud, frecuencia y orientaciones) a los que genera el propio cerebro humano. En el fantoma que aquí se va a describir (el cual está sujeto a patente [6]), el campo magnético se genera a través de unas pequeñas bobinas que deben alojarse en distintas ranuras diseñadas a tal efecto en un modelo físico que simula una cabeza humana. Un circuito electrónico externo controla y modifica el campo generado por dichas bobinas vía software, proporcionando de este modo distintos grados de libertad al sistema.

## 2. Diseño del fantoma

En primer lugar, es necesario tener en cuenta la distribución de los sensores del sistema de magnetoencefalografía para el cual se ha desarrollado el fantoma (Centro de Magnetoencefalografía de la Universidad Complutense de Madrid). En este caso, el equipo está formado por 148 *SQUIDS* (*Superconducting*

*Quantum Interference Devices*) dispuestos en geometría esférica. Es importante destacar que los equipos multicanal como el que aquí se describe (desarrollados en los últimos 10-15 años) son los más adecuados para el diagnóstico y la investigación médica, ya que ofrecen información de toda la superficie cerebral a la vez.

Para seleccionar el modelo de bobina comercial a utilizar (6.5 vueltas, 0.5 cm), se ha tenido en cuenta que a mayor número de vueltas, la señal de campo obtenida es más ideal (menos ruidosa), pero la corriente necesaria para generar una determinada magnitud de campo es menor, y por tanto, trabajar con señales más pequeñas puede ocasionar problemas de ruido.

La magnitud de las corrientes que circulan por las bobinas generadoras de campo magnético ha sido calculada teniendo en cuenta que el cerebro humano genera intensidades de campo en torno a 25-400 fT. Con estos datos y aplicando la fórmula que relaciona la corriente que circula por el eje central de una bobina con el número de vueltas de la misma, su longitud y el campo magnético generado (1), se obtiene como resultado que la corriente debe estar en el rango: 15-245 pA.

$$I = \frac{B \cdot L}{\mu_0 \cdot N} = \frac{(25-400) \cdot 10^{-15} \cdot 0.5 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 6.5} = (15-245) \text{ pA} \quad (1)$$

Por otro lado, hay que saber que la localización vertical de las fuentes de campo viene dada por los cortes horizontales que tiene el modelo físico, de manera que pueden establecerse varios niveles, quedando determinada la orientación de cada uno de los dipolos magnéticos a partir de las señales de entrada al sistema (tres señales por canal, correspondientes a cada uno de los tres ejes del sistema cartesiano). Cabe destacar que este diseño basado en rodajas paralelas con distribución uniforme de taladros para la ubicación de los generadores de campo ofrece numerosas posibilidades en lo que a la colocación de las fuentes de campo se refiere, lo cual da más versatilidad al sistema.

### 2.1. Obtención de las componentes del vector director de los dipolos magnéticos

Cada canal del fantoma se corresponde con una señal, denominada  $\vec{B}_0(t) = B_0(t) \vec{r}$ . Ésta es la señal asociada al módulo del vector final de campo, y está formada por la composición de otras tres señales identificadas como

$B_x \vec{x}, B_y \vec{y}, B_z \vec{z}$ . Cada componente se obtiene realizando una serie de desfases de la señal inicial, de modo que se verifique la siguiente igualdad:  $B_0^2 = B_x^2 + B_y^2 + B_z^2$ .

Para obtener cada una de las componentes, se parte de una señal genérica  $\vec{B}_0(t) = B_0(t) \cdot e^{j\omega t}$  que se descompone en sus tres componentes en función de los ángulos cenital ( $\theta$ ) y azimutal ( $\phi$ ) teniendo en cuenta que a partir del sistema de coordenadas esféricas puede definirse el vector de posición  $\vec{r}$  en cada punto del espacio, relacionando las coordenadas esféricas con las cartesianas (Figura 1).

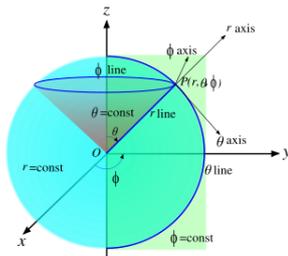


Figura 1. Relación entre coordenadas cartesianas y esféricas

La señal  $\vec{B}_0(t)$  puede expresarse en sus tres componentes definiendo a su vez cada una de ellas como suma de señales obtenidas a partir de la señal inicial, y de este modo, utilizando sumadores y módulos desfasesores deben poder obtenerse las componentes para cualquier señal de entrada al sistema.

Una vez completado el desarrollo matemático, puede, finalmente, construirse el diagrama de bloques del sistema final (Figura 2), es decir, del módulo orientador del dipolo magnético:

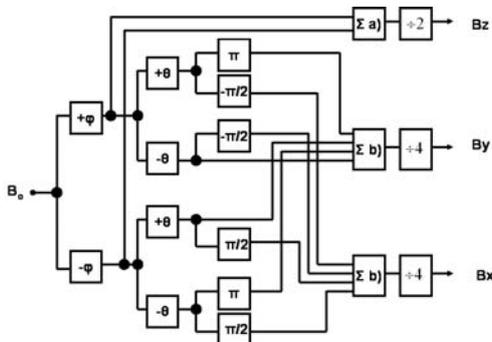


Figura 2. Módulo orientador del dipolo magnético

2.2. Subsistemas del fantoma

El sistema completo del fantoma está formado por los siguientes módulos [7] [8]:

- Una cabeza simulada dividida en porciones horizontales, que dispone de un orificio para el guiado de los cables que llevan las señales de excitación hasta los generadores de campo magnético y de una serie de alojamientos para fijar dichos generadores.

- Generadores de campo magnético, uno por cada canal del fantoma (el modelo implementado consta de dos canales). Cada generador de campo está formado por tres bobinas, que se distribuyen sobre un soporte en las direcciones de unos ejes coordenados (x, y, z).
- Etapas de acondicionamiento de señal para obtener, a partir de cada señal de tensión de entrada, la señal de corriente excitadora para las bobinas correspondiente:
  - Transformador de la tensión de entrada.
  - Circuito encargado de producir una corriente proporcional a la tensión de salida del transformador.
  - Transformador de corriente, cuya señal de salida alimenta la bobina correspondiente de cada generador de campo magnético.
- Software de control que permite controlar los parámetros del sistema y que incluye un módulo orientador del dipolo magnético configurado para obtener la señal de tensión de entrada de los acondicionadores de señal.
- Tarjeta de adquisición de datos que interconecta el software con el resto de elementos del sistema y genera las señales analógicas asociadas a cada uno de los canales del sistema.

3. Implementación del fantoma

3.1. Modelo de cabeza

El modelo de cabeza del fantoma está realizado en resina de poliuretano, y su implementación se ha llevado a cabo en tres pasos:

- Se ha utilizado el casco del equipo MEG como molde para realizar un modelo de cabeza de silicona (material que no daña el molde en su proceso de secado y es de fácil extracción)
- En segundo lugar, se ha realizado un vaciado de escayola utilizando para ello la cabeza de silicona previamente obtenida.
- Por último, y utilizando como molde el vaciado de escayola, se ha obtenido el modelo final de resina de poliuretano.

Tanto la distribución de las rodajas como de los taladros para situar los actuadores (de 3 mm diámetro, ya que el soporte del diedro que forman las bobinas de los actuadores es de este grosor) es homogénea y permite una amplia variedad de ubicaciones para dichos actuadores. Las rodajas horizontales tienen una anchura de 1.5 cm, teniendo en cuenta que la altura de los actuadores es de 1-1.3 cm. La última de las rodajas (la “tapa” de la cabeza), se ha realizado de un grosor algo mayor, para darle más consistencia al modelo. El resto de taladros pasantes, es decir, los que se utilizan para introducir los tornillos que

permiten fijar la estructura de rodajas (dos taladros de 1.5 cm de diámetro) y para introducir el cable coaxial con los actuadores (un taladro de 3 cm de diámetro) se han situado alineados y equiespaciados, tomando como referencia el taladro que debe quedar situado en el centro de cada rodaja (que será el que se utilice para introducir los cables con los actuadores en la cabeza) (Figura 3).



Figura 3. Distribución de las rodajas

### 3.2. Generadores de campo magnético

Tal y como se ha explicado anteriormente, cada uno de los canales del fantoma está formado por tres señales, correspondientes a cada uno de los ejes del sistema de coordenadas cartesianas. Por tanto, cada canal genera un dipolo orientado según las señales correspondientes a cada uno de los ejes (x, y, z) asociados.

Los generadores de campo se han fabricado utilizando como soporte pequeños cubos de madera de 7.5 cm. de lado, a los que se les ha realizado un pequeño taladro en una de sus caras para introducir una varilla de nylon encargada de fijar cada generador. Posteriormente, se han adherido bobinas en tres de las caras del cubo formando un diedro, y los terminales de las bobinas han sido conectados a cables coaxiales de pequeña sección que se comunican con el equipo electrónico (Figura 4).

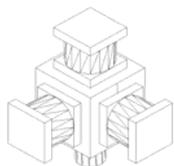


Figura 4. Distribución de las bobinas en cada actuador

### 3.3. Acondicionadores de señal

Las señales generadas vía software deben ser procesadas y adaptadas utilizando una serie de etapas de acondicionamiento de señal para que la señal en corriente que circula por las bobinas que forman los actuadores sea la adecuada para generar el campo magnético deseado, cuyas características deben ser similares a las del campo magnético generado por el cerebro humano.

Las etapas de acondicionamiento de señal son las siguientes:

- Transformación en tensión: el primer paso en la adaptación consiste en disminución de la magnitud de cada señal en un factor 15-20 utilizando un transformador toroidal.
- Transformación tensión-corriente: la segunda etapa tiene como objetivo transformar cada señal

de tensión en una señal de corriente utilizando un transistor PNP cuya señal de base será la señal de salida hacia las siguientes etapas del sistema hardware.

- Transformación de la señal de corriente: la tercera de las etapas de adaptación de la señal tiene como objetivo reducir en un factor 100 la magnitud de la señal procedente de la etapa anterior y conseguir una situación de bajo ruido (indispensable para trabajar con señales de pequeña magnitud) utilizando un transformador preamplificador en modo inverso.

### 3.4. Software de control y módulo orientador

El software de control del fantoma se ha diseñado teniendo en cuenta una serie de necesidades derivadas del objetivo principal del sistema que consiste en generar señales analógicas que posteriormente den lugar a señales de campo magnético que puedan ser detectadas utilizando el sistema de magnetoencefalografía para el cuál se ha diseñado el fantoma.

- El software permite utilizar como señales de salida las generadas por el propio programa, con formas de onda convencionales (sinusoidal, cuadrada, diente de sierra o triangular) o señales obtenidas previamente de otras medidas realizadas con el sistema MEG.
- Es posible elegir el tipo de señal que se desea generar, la frecuencia de la misma, la forma de onda y, o bien la amplitud de la señal de salida (la de la señal generada por la tarjeta de datos) o bien el campo magnético que se desea que se induzca en las bobinas asociadas a los distintos canales del fantoma. Esta funcionalidad se consigue si la función de transferencia del sistema completo está perfectamente pre-establecida.
- Otra opción importante que ofrece el programa es la de sincronización de las señales. Es posible trabajar con un canal o con los dos, pudiendo en este segundo caso elegir entre la opción de comenzar a generar las señales asociadas a los dos canales a la vez o la de comenzar a generar las señales de cada uno de los canales en un instante determinado a partir de un reloj o una señal de sincronización común.
- La aplicación ofrece al usuario la posibilidad de orientar en el espacio cada uno de los dipolos magnéticos asociados a los dos canales disponibles. Es posible visualizar la orientación de los vectores en cada momento gracias a una referencia espacial de la colocación de la cabeza en el sistema MEG, y se dispone de una serie de controles que facilitan que el ajuste.
- La generación de las señales puede resetearse o detenerse en cualquier momento para, de esta manera, poder hacer distintos bloques de medidas o pruebas.

- Por último, el sistema permite visualizar la señal base de cada uno de los canales y las señales obtenidas a partir de la anterior, es decir, las señales de salida del sistema asociadas a los ejes (x, y, z) de cada canal, las cuáles deben irse modificando instantáneamente al ir cambiando la orientación de los dipolos magnéticos.

### 3.5. Interconexión hardware-software

Para que todo el sistema del fantoma funcione correctamente, es necesario generar las señales analógicas vía software tal y como se ha explicado anteriormente para después adaptarlas y acondicionarlas de modo que los actuadores generen el campo magnético deseado en cada caso (Figura 5).

El cometido de la tarjeta de datos consiste en generar las señales correspondientes a la configuración realizada con el software de control que son posteriormente introducidas en el sistema de adaptación de la señal. La tarjeta permite que las señales tengan una correcta sincronización, que trabajen en un rango de  $\pm 10$  V y a frecuencias de entre DC y 250 Hz (rango de frecuencias de las señales detectadas con MEG).



Figura 5. Sistema hardware del fantoma multicanal

### 4. Primeros resultados

Una vez puesto a punto el fantoma, se han llevado a cabo las primeras baterías de pruebas de funcionamiento. Los resultados obtenidos en este proceso indican que el equipo MEG detecta perfectamente las señales generadas, que los canales tienen una buena sincronización, y que los cambios de orientación de los dipolos magnéticos se realizan de manera correcta (Figura 6).

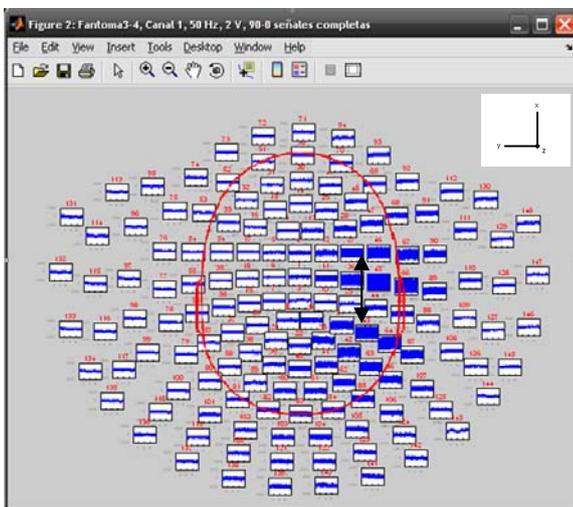


Figura 6. Orientación del dipolo magnético según el eje x

En este ejemplo puede verse la detección de señal en cada uno de los canales del equipo cuando el dipolo magnético está orientado en el eje x. Para entender los resultados es necesario tener en cuenta que esta representación es una transformación 2D de la distribución real 3D.

### 5. Conclusiones

El fantoma multicanal de dipolos magnéticos es una herramienta muy útil para realizar una gran variedad de pruebas y experimentos asociados a los denominados “modelos de sincronización” gracias a un software de control fácil e intuitivo y a un sistema hardware muy depurado, utilizando un modelo de cabeza que permite, gracias a su diseño, ubicar los actuadores en multitud de posiciones dando muchos grados de libertad al sistema.

### 6. Agradecimientos

Los autores de este artículo quieren dar las gracias a los miembros del Centro MEG de la Universidad Complutense de Madrid por su colaboración en el proceso de realización del fantoma, tanto a nivel teórico como técnico, y por permitir a nuestro equipo de trabajo realizar las pruebas de funcionamiento del sistema.

### Referencias

- [1] Maestú F, González-Marqués J, Marty G, Nadal M, Cela-Conde C J, Ortiz T. La magnetoencefalografía: una nueva herramienta para el estudio de los procesos cognitivos básicos. *Psicothema*, vol 17, sup 3, 2005, pp 459-464 (ISSN 0214-9915).
- [2] Maestú C, Gómez-Utrero E, Piñeiro R, Sola R G. Magnetoencefalografía: una nueva técnica de diagnóstico funcional en neurociencia. *Revista de Neurología*, vol 28, sup 3, pp 1077-1090, 1999 (ISSN 1576-6578).
- [3] Stam C J. Functional connectivity patterns of human magnetoencephalographic recordings: a ‘small-world’ network. *Neuroscience Letters*, vol 355, sup 1-2, pp 25-28, 2004 (ISSN 0304-3940).
- [4] Van Cappellen van Walsum A M, Pijenburg Y A L, Berendse H W, van Dijk B W, Knol D L, Scheltens P, Stam C J. A neural complexity measure applied to MEG data in Alzheimer's disease. *Clinical Neurophysiology*, vol 114, sup 3, pp 1034-1040, 2003 (ISSN 1388-2457).
- [5] Schnitzler A, Gross J. Normal and pathological oscillatory communication in the brain. *Nature Reviews Neuroscience*, vol 6, sup 4, pp 285-96, 2004 (ISSN 1471-0048).
- [6] Serrano Olmedo JJ, Poley Gómez A, Del Pozo Guerrero F. Fantoma multicanal de dipolos magnéticos orientables para magnetoencefalografía. *Oficina Española de Patentes y marcas, Ministerio de Industria, turismo y Comercio*. Solicitud de Patente de Invención 200802743, 2008.
- [7] Sánchez López de Pablo C, Serrano Olmedo JJ. Realización de un fantoma multicanal para magnetoencefalografía y de un magnetómetro de baja frecuencia para dosimetría. *GBT-UPM*, 2009.
- [8] Poley Gómez A, Serrano Olmedo JJ. Diseño y caracterización de un fantoma para el centro de magnetoencefalografía de un centro universitario. *GBT-UPM*, 2008.