

Inversión 3D de datos de EM con cable remolcado: estudio de un modelo del campo Harding en comparación con CSEM

Michael S. Zhdanov,^{1,2} Chris Anderson,³ Masashi Endo,¹ Leif H. Cox,¹ Martin Cuma,^{1,2} Glenn A. Wilson,^{1*} Noel Black¹ y Alexander V. Gribenko^{1,2} presentan un reciente estudio de los retos involucrados en la validación de los datos electromagnéticos (EM) marinos adquiridos utilizando un receptor de cable remolcado (actualmente en desarrollo) y comparan los resultados con la tecnología existente de fuente electromagnética controlada (CSEM) de fondo marino.

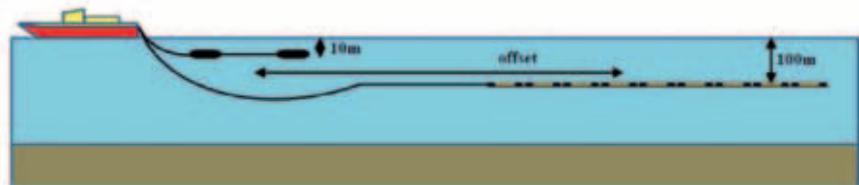
La premisa de los diversos métodos marinos de fuente electromagnética controlada (CSEM) es la sensibilidad a las extensiones laterales y a los espesores de los cuerpos resistivos enclavados en huéspedes conductivos. Durante la última década, las prospecciones CSEM se habían caracterizado por series de receptores fijos en el fondo del océano y transmisores remolcados y se habían aplicado para eliminar riesgos en la exploración y en proyectos de valoración con indicación directa de hidrocarburos. Las aplicaciones más exitosas de CSEM hasta la fecha se han obtenido al complementar aquellas interpretaciones sísmicas donde las variaciones litológicas o de fluidos no pueden ser adecuadamente discriminadas únicamente con métodos sísmicos (p.ej., Hesthammer et al., 2010). Sin embargo, los costes relativamente elevados de la adquisición han representado un obstáculo importante para la adopción generalizada de la tecnología CSEM convencional, particularmente en cuencas de frontera exploratoria. Con este fin, se ha desarrollado un sistema de cable remolcado capaz de adquirir datos sísmicos y electromagnéticos (EM) simultáneamente y se ha probado en el mar del Norte (Anderson y Mattsson, 2010; Mattsson et al., 2010; Linfoot et al., 2011; McKay et al., 2011) (Figura 1). Esta geometría de plataforma móvil permite adquirir datos EM sobre áreas muy grandes tanto en cuencas de frontera como en cuencas maduras para tener mayores tasas de producción y menores costes en comparación con los métodos CSEM convencionales.

En exploración, las reservas y recursos de hidrocarburos se estiman con una confianza variable a partir de la volumetría que se predice de diferentes escenarios y modelos terrestres 3D. La interpretación cuantitativa de los datos EM es intrínsecamente dependiente de los modelos terrestres 3D derivados de la inversión, ya que los datos EM no pueden ser simplemente separados o transformados mediante operadores lineales como en los métodos sísmicos. Sin embargo, los métodos para invertir los datos CSEM son complicados por las respuestas muy pequeñas, no exclusivas y no lineales de las unidades de yacimientos de hidrocarburos cuando se compara con los campos totales medidos. Es más, la inversión 3D de datos EM de cable remolcado plantea un importante reto debido a la creciente escala de las prospecciones, los requerimientos de modelos de alta resolución y el número significativamente mayor de pares transmisor-receptor.

Inversión de datos EM de cable remolcado

Las prospecciones CSEM convencionales de gran escala pueden tener del orden de cientos de receptores fijos y del orden de miles de posiciones de transmisión. En la modelización 3D CSEM convencional se utiliza rutinariamente la reciprocidad para minimizar el número de términos de origen que deben resolverse (p.ej., Zhdanov et al., 2011). Las prospecciones EM con cable remolcado pueden tener miles de posiciones de transmisión y miles de posiciones de recepción. No se puede utilizar la reciprocidad para ninguna

Figura 1 Representación esquemática de un sistema EM de cable remolcado con un transmisor único en un cable arrastrado 10 m bajo la superficie del agua y receptores multi-offset en un cable nominalmente remolcado 100 m bajo la superficie del mar.



¹ TechnoImaging, 4001 South, 700 East, Suite 500, Salt Lake City UT 84107, EE.UU.

² The University of Utah, 1450 East, 100 South, Salt Lake City UT 84102, EE.UU.

³ Petroleum GeoServices, 4 The Heights, Brooklands, Weybridge, Surrey, KT13 0NY, REINO UNIDO

⁴ Correo electrónico del autor de contacto: glenn@technoimaging.com

EM y métodos potenciales

eficiencia computacional. En este sentido, las prospecciones EM con cable remolcado son análogas a las prospecciones EM aerotransportadas (AEM) en qué consisten en mover pares transmisión-receptor. Según nuestros recientes desarrollos, que culminaron con la primera metodología práctica de inversión AEM 3D de gran escala (p. ej. Cox et al., 2010), podemos explotar el hecho de que el volumen de la sensibilidad integrada del sistema EM de cable remolcado es significativamente menor que el tamaño del área de prospección e introducimos el concepto de dominio de sensibilidad móvil. Esto es, para un par dado transmisor-receptor, las respuestas y las derivadas de Frechet se calculan a partir de un modelo terrestre 3D que condensa la sensibilidad del sistema EM de cable remolcado. Luego se construye la matriz de Frechet dispersa (en lugar de completa) para el modelo terrestre 3D completo como la superposición de las derivadas de Frechet para todos los dominios de sensibilidad integrados (Figura 2). Se deduce que los requerimientos de memoria y computacionales pueden reducirse en varios órdenes de magnitud. Por ejemplo, el número de elementos diferentes de cero en cada fila de la matriz de Frechet es sólo el número de celdas dentro de cada dominio de sensibilidad (del orden de miles a decenas de miles) en lugar del número total de celdas en el modelo terrestre 3D (del orden de millones). Por ejemplo, este concepto de dominio de sensibilidad móvil ha hecho que

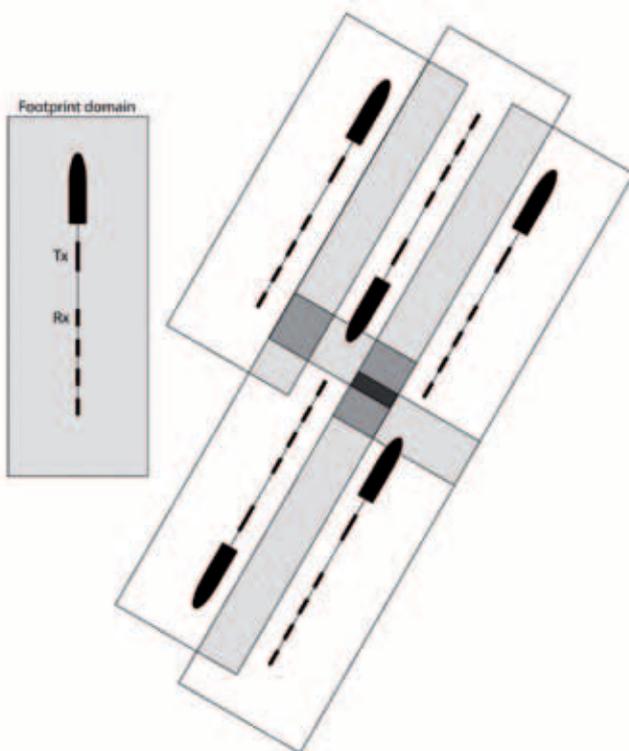


Figura 2 Vista en planta de varios dominios de sensibilidad de EM con cable remolcado superpuestos sobre el mismo modelo terrestre 3D. Los sombreados más oscuros indican una mayor cobertura de los diferentes dominios de sensibilidad.

sea práctico para nosotros invertir los datos AEM de cientos de millones de posiciones de transmisores para los modelos terrestre 3D con más de 15 millones de celdas.

Nuestra modelización en el dominio de frecuencia está basada en el método de ecuación integral (IE) de contracción 3D (Hursan y Zhdanov, 2002). En la práctica, hay varias ventajas distintas en la utilización de un método IE para la inversión del dominio de sensibilidad móvil en lugar de cualquiera de los métodos de diferencia finita, volumen finito o elementos finitos. Primero, no hace falta calcular los tensores de Green y los campos eléctricos de fondo más allá del dominio de sensibilidad del sistema EM de cable remolcado y todas las condiciones de límite del dominio de sensibilidad coinciden perfectamente. Segundo, los tensores de Green cuerpo-a-cuerpo se pueden precomputar para un único dominio de sensibilidad y trasladar a través del modelo terrestre 3D completo. Tercero, la ecuación integral se puede escribir para resolver directamente el campo eléctrico total en el modelo terrestre 3D a la vez que se conserva el término de fuente distribuido. Cuarto, la ecuación integral se puede expresar como una convolución, permitiendo multiplicaciones FFT matriz-vector para reducir la complejidad computacional en los métodos del subespacio de Krylov desde $O(n^2)$ hasta $O(n \log n)$. Quinto, las derivadas de Frechet se pueden calcular con exactitud para gastos insignificantes utilizando el método casi analítico. Sexto, no hace falta que los pares transmisor-receptor y sus dominios de sensibilidad correspondan con posiciones de la cuadrícula, bordes o centros. Finalmente, en la práctica, la indexación basada en el dominio de sensibilidad se puede generalizar para incluir la discretización del modelo de frecuencia y el tamaño de la impronta. Para EM en el dominio de tiempo, las respuestas del sistema y las derivadas de Frechet se pueden obtener por la transformación de Fourier de las respuestas del dominio de frecuencia y las derivadas de Frechet.

Utilizamos un método reponderado de gradiente conjugado regularizado para minimizar nuestra función paramétrica de Tikhonov que incorpora la regularización de enfoque (Zhdanov, 2002). Tal y como demostraron Zhdanov et al. (2011), la regularización de enfoque es necesaria para recuperar modelos 3D de resistividad con fuertes contrastes, por ejemplo, entre un yacimiento cargado de hidrocarburos y su huésped circundante. Los métodos tradicionales de regularización suavizada tienden a subestimar el modelo 3D de resistividad con modelos excesivamente suaves. Además, Zhdanov et al. (2011) demostraron que la regularización de enfoque puede mejorar la convergencia de la inversión durante la regularización suavizada.

Estudio de un modelo: Harding, mar del Norte

Harding es un campo de petróleo y gas de tamaño mediano que cubre aproximadamente 20 km^2 en el bloque 9/23B en el sector del Reino Unido del mar del Norte, a unos 320 km al noreste de Aberdeen.

EM y métodos potenciales

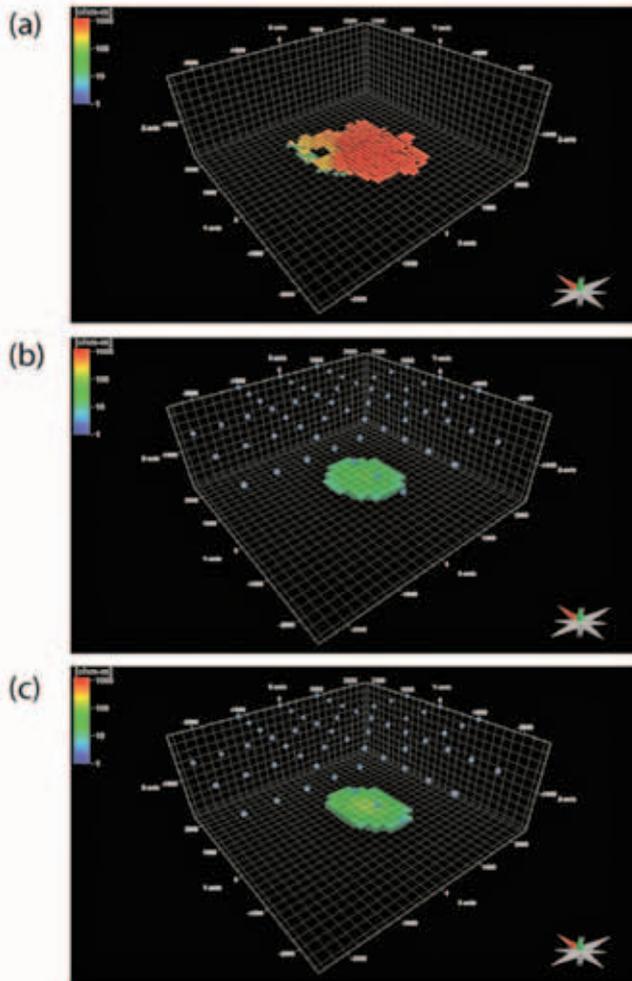


Figura 3 (a) Vista 3D en perspectiva del modelo de yacimiento de Harding Central mostrando valores de resistividad mayores que 10 ohm-m. (b) Vista 3D en perspectiva del modelo de yacimiento de Harding Central recuperado de la inversión 3D de datos EM de cable remolcado, con valores de resistividad mayores que 10 ohm-m. Los puntos azules indican las diferentes posiciones de transmisión. (c) Vista 3D en perspectiva del modelo de yacimiento de Harding Central recuperado a partir de la inversión 3D de datos CSEM convencionales, mostrando valores de resistividad mayores que 10 ohm-m. Los puntos azules indican las diferentes posiciones sobre el fondo marino de los receptores.

El campo tiene un yacimiento de elevado neto/bruto y gran calidad en las areniscas Balder eocenas a unos 1700 m bajo el fondo marino, en una columna de agua de 110 m. La producción comenzó en 1996 en los yacimientos Harding Central y Sur, con 300 mbep iniciales. Desde entonces, se han desarrollado otros dos yacimientos: Harding Sureste y, por perforación de alcance extendido, Harding Norte. Los yacimientos contienen gas y éste se ha vuelto a inyectar en una capa gasífera para una posterior producción. La producción de petróleo está ahora en declive, con una producción actual de aproximadamente 10.000 b/d con un aumento del corte de agua. La columna de hidrocarburos restante consiste en una capa gasífera de alrededor de 100 m de espesor y una delgada aureola de petróleo de unos 20 m de espesor (Ziolkowski et al., 2010).

Los modelos de porosidad y de saturación de fluidos de Harding Central se obtuvieron de simulaciones de yacimientos con historial coincidente construidas a partir de datos de producción, registros de pozo e interpretaciones sísmicas 3D. Los análisis de los testigos muestran que las arenas almacén de Balder en Harding son limpias, por lo que la ley de Archie es apropiada para relacionar las propiedades petrofísicas con la resistividad. Los registros de resistividad del pozo 9/23B-7 mostraron resistividades mayores que 1200 ohm-m a través de los intervalos de gas seco. En realidad, algunos intervalos pueden superar resistividades de 1200 ohm-m, pero los límites resistivos de las respuestas CSEM significan que sus valores reales no son discernibles a partir de los datos CSEM. Igual que para Ziolkowski et al. (2010), nuestro modelo 3D de resistividad consistió en 100 m de columna de agua de 0,3 ohm-m sobre un espacio medio homogéneo diferente de 1,9 ohm-m en el cual se ha incrustado el modelo del yacimiento Harding (Figura 3a).

La prospección EM remolcada consistió en seis líneas de prospección: tres orientadas norte-sur y tres orientadas este-oeste. El espaciado de las líneas fue de 1 km. Cada línea contenía 44 pares transmisor-receptor espaciados 500 m (264 en total).

El sistema EM remolcado consistió en un transmisor de bipolo eléctrico de 300 m de longitud arrastrado 10 m bajo la superficie del mar y receptores del campo magnético alineados arrastrados 50 m bajo la superficie del mar con offsets de 1325 m, 1850 m, 2025 m y 2545 m. Se simularon los datos para 0,10 Hz, 0,25 Hz y 1,00 Hz. Para la inversión, los datos fueron el umbral por encima de su respectivo ruido de fondo.

Por comparación, la prospección CSEM convencional consistió en seis líneas de prospección: tres orientadas norte-sur y tres orientadas este-oeste. La prospección CSEM convencional se colocó realmente al lado de la prospección EM remolcada. El espaciado entre líneas fue de 1 km. Cada línea contenía 11 receptores espaciados 500 m, dando un total de 66 receptores. Los datos se simularon a offsets de 5500 m para campos eléctricos alineados y verticales y campos magnéticos transversales a frecuencias de 0,10, 0,25, 0,50 y 0,75 Hz. Para la inversión, los datos fueron el umbral por encima de sus respectivos ruidos de fondo. Los datos CSEM convencionales se invirtieron utilizando el método de migración iterativa descrito por Zhdanov et al. (2011).

Para comparar las inversiones 3D tanto de los datos de EM remolcada como de CSEM convencional se ha utilizado un modelo terrestre 3D común. Este modelo consistió en 110 m de espesor de columna de agua de 0,3 ohm-m sobre un espacio medio homogéneo diferente de 1,0 ohm-m. El dominio de inversión 3D se discretizó a celdas de 200 m x 200 m x 20 m de tamaño.

No se utilizó un modelo a priori y la propia inversión no se restringió. Los resultados de la inversión 3D de la EM

EM y métodos potenciales

de cable remolcado se muestran en la Figura 3b (con las posiciones de los transmisores superpuestas). Los resultados de la inversión 3D de la CSEM convencional se muestran en la Figura 3c (con las posiciones de los receptores superpuestas). Como se puede apreciar, hay mucha similitud entre los resultados de las inversiones de la EM remolcada y la CSEM convencional. A todos los efectos, los resultados se pueden considerar equivalentes.

Conclusiones

Obviando la necesidad de receptores de fondo oceánico, el sistema de EM remolcado permite adquirir datos CSEM simultáneamente con la sísmica sobre áreas muy grandes en cuencas de frontera exploratoria y cuencas maduras para obtener mayores tasas de producción y costes relativamente bajos respecto a los métodos CSEM convencionales. El mayor volumen de datos CSEM representa un reto para los métodos de inversión 3D de CSEM existentes. Por ello, hemos introducido una metodología práctica para la inversión 3D a gran escala de datos EM de cable remolcado que está basada en un dominio de sensibilidad móvil. Hemos demostrado esto con estudios de modelos para el campo Harding, en el sector del Reino Unido del mar del Norte. Hemos comparado nuestra inversión 3D de datos EM de cable remolcado sintéticos con la inversión 3D de datos CSEM convencionales sintéticos y hemos observado similitudes entre los modelos 3D de resistividad. Esto demuestra que los datos EM de cable remolcado pueden recuperar adecuadamente los objetivos de hidrocarburos de tamaño mediano a profundidades de alrededor de 2 km.

Agradecimientos

Los autores agradecen a TechnoImaging y Petroleum GeoServices (PGS) la financiación de esta investigación y el permiso de publicación. Zhdanov y Cuma agradecen la financiación del Consorcio de la Universidad de Utah para la Modelización e inversión electromagnética (CEMI) y del Centro de computación de alto rendimiento. Los modelos 3D de resistividad de Harding se elaboraron como parte

del proyecto de investigación H0531E entre PGS, BP y el Departamento de comercio e industria de Reino Unido (ahora de Empresa, innovación y cualificaciones). Se agradece a BP y Maersk como operadores del campo Harding por el lanzamiento del modelo de yacimiento de Harding. Agradecemos a los Drs. Bruce Hobbs y Ed Morris su asistencia con los modelos de yacimiento de Harding.

Referencias

- Anderson, C. and Mattsson, J. [2010] An integrated approach to marine electromagnetic surveying using a towed streamer and source. *First Break*, 28(5), 71–75.
- Cox, L.H., Wilson, G.A. and Zhdanov M.S. [2010] 3D inversion of airborne electromagnetic data using a moving footprint. *Exploration Geophysics*, 41, 250–259.
- Hesthammer, J., Stefatos, A., Boulaenko, M., Fanavoll, S. and Danielsen, J. [2010] CSEM performance in light of well results. *The Leading Edge*, 29, 34–41.
- Hursán G. and Zhdanov M. S. [2002] Contraction integral equation method in three-dimensional electromagnetic modeling. *Radio Science*, 37(6), 1089. doi: 10.1029/2001RS002513.
- Linfoot, J.P., Clarke, C., Mattsson, J. and Price, D. [2011] Modeling and analysis of towed EM data - An example from a North Sea field trial. *73rd EAGE Conference and Exhibition*, Vienna.
- Mattsson, J.M., Lund, L.L., Lima, J.L., Englemark, F.E. and McKay, A.M. [2010] Case study – A towed EM test at the Peon discovery in the North Sea. *72nd EAGE Conference and Exhibition*, Barcelona.
- McKay, A., Clarke, C., Linfoot, J. and Mattsson, J. [2011] Interpretative quality control of towed EM data - Examples from the North Sea. *73rd EAGE Conference and Exhibition*, Vienna.
- Ziolkowski, A., Parr, R., Wright, D., Nockles, V., Limond, C., Morris, E. and Linfoot, J. [2010] Multi-transient electromagnetic repeatability experiment over the North Sea Harding field. *Geophysical Prospecting*, 58, 1159–1176.
- Zhdanov, M.S. [2002] *Geophysical Inverse Theory and Regularization Problems*. Elsevier, Amsterdam.
- Zhdanov, M.S., Čuma, M., Wilson, G.A., Velikhov, E.P., Black, N. and Gribenko A. [2011] Iterative electromagnetic migration for 3D inversion of marine CSEM data. *Geophysical Prospecting*, 59, 1101–1113.