

Teledetección orbital global: Principios de la RMN móvil pasiva

Combinación de calibración de frecuencia de profundidad y relajación de hidrógeno para el marcado de tanques.

RESUMEN

1. El principio de investigación en profundidad (calibración de frecuencia) . . . 1
2. Marcado espectral por tiempo de relajación (T1 y T2) 1
3. Discriminación física directa de fluidos 2
4. Metodología Operativa Estratégica: Paso Cero 2
5. Principales ventajas para la exploración industrial 2

1. El principio de la investigación exhaustiva (calibración de frecuencia)

En la observación pasiva a gran escala (sin contacto con el suelo), la capacidad de sondear el subsuelo a profundidades específicas (hasta 7 km) se basa en una ley física fundamental: la relación de Larmor. La frecuencia de resonancia magnética (ω_0) de los núcleos de hidrógeno es directamente proporcional a la intensidad del campo magnético (B_0) en el que están inmersos.

$$\omega_0 = \gamma \cdot B_0$$

Dado que el componente estático del campo magnético terrestre o los gradientes inducidos varían de forma predecible con la profundidad sedimentaria, el sistema orbital realiza una selección geométrica precisa ajustando la frecuencia del pulso de radiofrecuencia emitido. Al modular esta frecuencia de sintonización, las ondas atraviesan las capas superiores sin interacción significativa (medios dieléctricos transparentes) y solo resuenan a la profundidad exacta donde se cumple la condición de Larmor, lo que provoca la excitación exclusiva de los protones en esa capa subsuperficial.

2. Marcado espectral por tiempo de relajación (T1 y T2)

Una vez interrumpido el pulso de radiofrecuencia, los protones excitados regresan a su estado inicial. Este proceso libera una onda de radio de retorno que es detectada por sensores orbitales. El análisis de la atenuación de esta señal permite medir los tiempos de relajación transversal (T2) y longitudinal (T1), lo que proporciona un perfil del entorno fluido.

- Eliminación de entornos estériles (tiempos cortos): El agua atrapada en los poros diminutos de las arcillas o confinada en rocas ultracompactas experimenta una relajación superficial agresiva. Su tiempo T2 es menor a 10 o 33 milisegundos. La señal desaparece instantáneamente, clasificando estas áreas como no reproducibles.
- Identificación de yacimientos y "puntos óptimos" (tiempos largos): En una roca de yacimiento de buena calidad (arenisca o carbonatos con porosidad abierta), los fluidos tienen una gran libertad de movimiento. Las interacciones con la pared de la roca son limitadas, lo que resulta

Teledetección orbital global: Principios de la RMN móvil pasiva

en tiempos de relajación largos ($T_2 > 33$ ms en arenisca, $T_2 > 92$ ms en carbonatos). Estas áreas se reflejan por anomalías de alta amplitud en las lecturas.

3. Discriminación física directa de fluidos

Más allá de la simple detección de un área porosa, la combinación precisa de las señales T1 y T2 permite certificar la naturaleza del fluido presente en la porosidad analizada:

- Petróleo ligero: Presenta una relación T1/T2 estable, generalmente entre 1 y 2, asociada a una relajación intermedia estable. Esta firma específica refleja directamente la acumulación de petróleo crudo comercializable.
- Gas natural: Bajo la influencia de la fuerte dinámica de difusión molecular inducida por los gradientes de microcampo de las matrices porosas, el gas muestra una asimetría única con un T1 longitudinal muy extendido (varios segundos) y un T2 transversal drásticamente acortado. Esta anomalía espectral no debe confundirse con agua ni roca estéril.

4. Metodología Operativa Estratégica: Paso Cero

La integración industrial de esta tecnología reconfigura la exploración sedimentaria a gran escala según un protocolo en forma de embudo:

1. *Escaneo global (Etapa cero): Estudio completo de un bloque de exploración sedimentaria a gran escala mediante satélites, mapeando pasivamente las variaciones estructurales globales.*
2. *Filtrado geofísico: Enmascaramiento instantáneo de todas las áreas caracterizadas por respuestas cortas de RMN (T_2 rápido), eliminando más del 70 % de las áreas sin potencial.*
3. *Mapeo móvil de fluidos: Identificación de firmas espectrales de relajación larga, validando la presencia de fluidos explotables.*
4. *Orientación precisa: Delimitación de los contornos de las zonas de mayor interés. De esta manera, las campañas de adquisición sísmica 3D a gran escala o la perforación exploratoria se guían con precisión hacia objetivos con alta probabilidad de éxito.*

5. Principales ventajas para la exploración industrial

- Rentabilidad y ahorro de tiempo: La creación de este mapa en 4 a 6 meses evita las enormes inversiones asociadas con el despliegue de redes sísmicas ciegas en miles de kilómetros cuadrados de terrenos baldíos.
- Discreción total e impacto cero: El proceso opera de forma remota y pasiva. No requiere permisos ambientales extensos sobre el terreno, elimina el impacto ecológico de los camiones vibratorios y previene la especulación de tierras.
- Revitalización de dominios maduros: El sistema permite escanear bloques antiguos ya en operación para identificar bolsas de hidrocarburos no detectadas o yacimientos satélite profundos no identificados, sin interrumpir la actividad industrial en curso.