

Verteilte faseroptische Sensoren in der Hydroakustik

Konstantinos Karatziotis¹, Dennis Seidler², Karoline Gussow¹, Viktoriia Boichenko¹,
Christian Kanarsaki¹, Marco Driesen¹, Finn Röhrdanz¹, Lukas Schirmer¹,
Ralf Burgardt¹, Dirk Meyners², Eckhard Quandt², Gerhard Schmidt¹

¹ *Digitale Signalverarbeitung und Systemtheorie, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel,*

² *Anorganische Funktionsmaterialien, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel,*

E-mail: {koka, dese, kars, vib, chk, madr, finr, lusc, rabu, dm, eq, gus}@tf.uni-kiel.de

Einleitung

Für präzise hydroakustische Messungen in der Meeresforschung ist es oft von großem Interesse, umfangreiche Hydrophon-Arrays zu konstruieren. Ein klassisches Anwendungsbeispiel hierfür ist die Schleppantenne, die unter anderem zur Meeresbodenvermessung oder zur Suche nach Ölfeldern eingesetzt wird.

Der Bau solcher großen Arrays mit konventionellen Hydrophonen ist jedoch mit Problemen verbunden. Zum einen werden hierbei viele Hydrophone benötigt, was zu hohen Kosten führt. Zum anderen erfordert jedes Hydrophon eine separate Verkabelung innerhalb der Antenne, welches zum einem hohen Gesamtgewicht solcher Systeme resultiert.

Hierbei ist die Messung mittels Lichtwellenleitern von Interesse, die mithilfe eines speziellen Verfahrens in ein kilometerlanges Sensorsystem umgewandelt werden können. In der Regel ist dabei nur ein einziger Lichtwellenleiter erforderlich, wodurch über eine Leitung sehr viele Sensoren realisiert werden können. Im Folgenden soll untersucht werden, in welchem Maße andere Lichtwellenleiterkonfigurationen im Vergleich zum geraden Lichtwellenleiter die Signalqualität verbessern können.

Distributed Acoustic Sensing

Um einen Lichtwellenleiter als Sensor zu verwenden, kommt das Verfahren des *Distributed Acoustic Sensing* (DAS, deutsch: verteilte akustische Erfassung) zum Einsatz. Dabei handelt es sich um eine Methode, bei der Lichtwellenleiter als kontinuierlich verteilte Sensoren genutzt werden, um seismische Daten über große Distanzen zu erfassen. Neben seismischen Signalen können mit DAS auch hydroakustische Signale detektiert werden.

Zur Datenerfassung sendet ein spezielles Auslesesystem, häufig als *Interrogator* bezeichnet, mithilfe eines kohärenten Lasers kontinuierlich kurze Lichtimpulse in den Lichtwellenleiter. Aufgrund von Inhomogenitäten im Lichtwellenleiter wird ein Teil des Lichts durch Rayleigh-Streuung zurückgestreut. Wirkt eine mechanische Spannung auf den Lichtwellenleiter – beispielsweise durch eine akustische Welle –, so führt dies über den photoelastischen Effekt zu einer Änderung des Brechungsindex und damit zu einer Phasenverschiebung des rückgestreuten Signals.

Zur Lokalisierung dieser Änderung wird die Phasenverschiebung zwischen zwei definierten Punkten entlang der

Faser ausgewertet. Der Abstand zwischen diesen Punkten wird als Gauge-Länge L_G bezeichnet. Die gemessene Phasenänderung entspricht dabei der über die Gauge-Länge gemittelten lokalen axialen Dehnung [1]:

$$\varepsilon_{xx}(x, t) = \frac{1}{L_G} \int_{x - \frac{L_G}{2}}^{x + \frac{L_G}{2}} \varepsilon_x(x', t) dx'. \quad (1)$$

Aus den intrinsischen Eigenschaften des Lichtwellenleiters ergibt sich ein linearer Zusammenhang zwischen der Dehnung und der gemessenen Phasenverschiebung [1]:

$$\Delta\Phi(x, t) = \frac{4\pi n}{\lambda} \cdot L_G \cdot \varepsilon_{xx}(x, t) \cdot (1 - p_e). \quad (2)$$

Dabei bezeichnet λ die Wellenlänge des Lasers, n den Brechungsindex und p_e den photoelastischen Koeffizienten des Lichtwellenleiters.

Sensitivität des Wellenleiters

Da die Phasenänderung primär durch axiale Dehnung verursacht wird, weist der Lichtwellenleiter abhängig vom Wellentyp eine unterschiedliche Sensitivität auf. Für Primärwellen (P-Wellen), also Longitudinalwellen – wie sie beispielsweise bei Unterwasserschall auftreten –, kann die Richtungsabhängigkeit der Sensitivität in Abhängigkeit vom Einfallswinkel θ durch

$$D_p(\theta) = \cos^2(\theta) \quad (3)$$

beschrieben werden [1]. Daraus folgt, dass P-Wellen, die seitlich auf den Lichtwellenleiter treffen, nur mit geringer Sensitivität erfasst werden.

Für Sekundärwellen (S-Wellen), also Transversalwellen, die sich in Festkörpern ausbreiten, wird die Sensitivität durch

$$D_s(\theta) = \sin^2(2\theta) \quad (4)$$

beschrieben [1].

Übliche Wellenleiter sind in der Regel von einem Kabel ummantelt, das ebenfalls die Sensitivität gegenüber Schallwellen beeinflusst. Abhängig vom verwendeten Material führt gemäß dem Poisson-Effekt eine Querdehnung $\varepsilon_{\text{trans}}$ zu einer Längsdehnung $\varepsilon_{\text{axial}}$. Neben dem allein durch den Lichtwellenleiter verursachten Poisson-Effekt kann durch die gezielte Auswahl geeigneter Materialien der Ummantelung die Sensitivität des Wellenleiters gegenüber Schallwellen – insbesondere bei seitlicher Anregung – erhöht werden. Der entsprechende Materialkennwert wird durch die Poisson-Zahl

$$\nu = -\frac{\varepsilon_{\text{trans}}}{\varepsilon_{\text{axial}}} \quad (5)$$

beschrieben [2]. Eine andere Möglichkeit zur Verbesserung der Richtungsabhängigkeit der Sensitivität besteht in der Variation der Geometrie des Lichtwellenleiters. Ein Beispiel ist eine Wellenleiterkonfiguration in Form einer Helix. Hierbei wird der Lichtwellenleiter um einen Zylinder gewickelt.

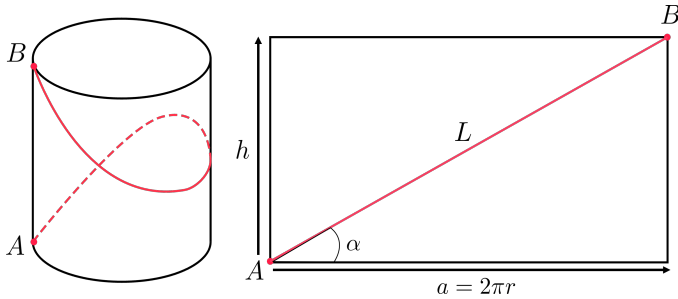


Abbildung 1: Helikale gewickelter Lichtwellenleiter und un- verpackte Oberfläche.

Die effektive Länge pro Windung des Wellenleiters hängt vom Wicklungswinkel α ab. Die Sensitivität einer Helix auf eine P-Welle – unter Vernachlässigung der Materialparameter – kann durch

$$D_{\text{Helix}}(\theta, \alpha) = \cos^2(\theta) \sin^2(\alpha) + \frac{1}{2} \sin^2(\theta) \cos^2(\alpha) \quad (6)$$

beschrieben werden [2].

OptoDAS und Helix-Konfiguration

Als DAS-System wird das von ASN entwickelte System OptoDAS verwendet. Bei diesem System wird anstelle eines Laserpulses ein Chirpsignal in den Wellenleiter eingespeist, dessen Reflexionen und Phasenänderungen mithilfe eines *matched filter* (deut: Optimalfilter) ausgewertet werden. Anschließend wird auf die Phasendaten ein räumlich gleitender Mittelwert mit der Länge der Gauge-Länge angewendet.

Zur Bestimmung der Phasenänderung wird die Differenz zweier Datenpunkte berechnet, die um eine Gauge-Länge voneinander getrennt sind. Das OptoDAS-System ermöglicht eine räumliche Abtastung des Wellenleiters

mit einer Auflösung von bis zu 1 m sowie die Einstellung einer Gauge-Länge von bis zu 2 m.

Bezüglich der Lichtwellenleiter-Array-Konfiguration wird neben einem geraden Lichtwellenleiter auch ein helixgewickelter Lichtwellenleiter vermessen. Hierfür wurden mithilfe des 3D-Drucks vier Helix-Elemente gefertigt, die jeweils eine Höhe von $h = 10$ cm, einen Radius von $r = 5,8$ cm und $W = 10$ Windungen aufweisen. Der Wicklungswinkel wurde auf $\alpha = 1,47^\circ$ festgelegt.

An einem Rohr mit einem Radius von 5 cm wurden vier dieser Helix-Elemente sowie eine Halterung angebracht. Daraus ergibt sich eine Gesamtlänge der Helix von etwa $L_{\text{Total}} \approx 14.616$ m.

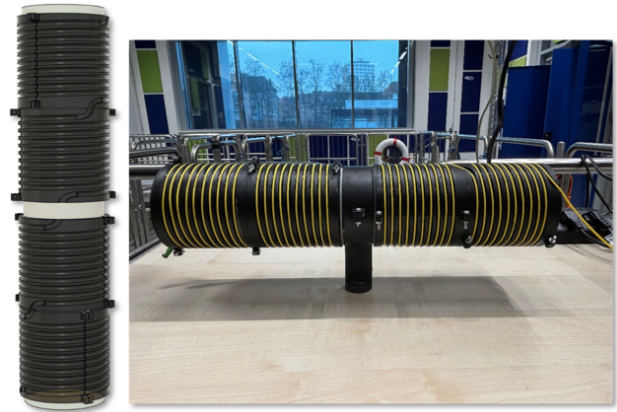


Abbildung 2: Komplette Helix bestehend aus vier Helix- Elementen.

Messaufbau

Zur Beurteilung der Effektivität der Helix-Konfiguration erfolgten im Wassertank des Zentrums für vernetzte Sensorsysteme (ZEVS) der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel zwei Direktivitätsmessungen, jeweils mit der Helix sowie mit einem geraden Lichtwellenleiter. Der wassergefüllte Tank mit den Abmessungen $5 \text{ m} \times 5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ ist mit Dämmmatten ausgekleidet, um Mehrfachreflexionen zu minimieren. Die gesamte Messkette ist in Abbildung 3 dargestellt.

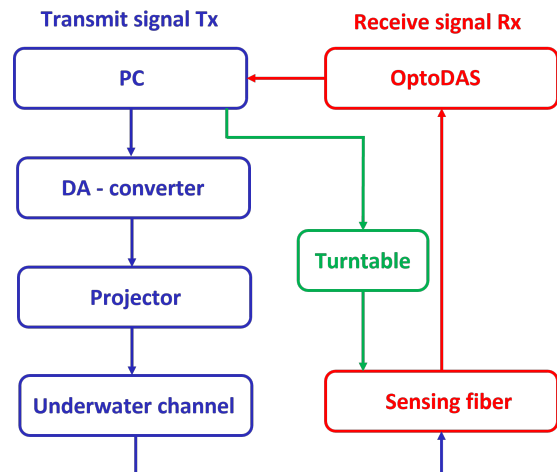


Abbildung 3: Messkette des Messaufbaus.

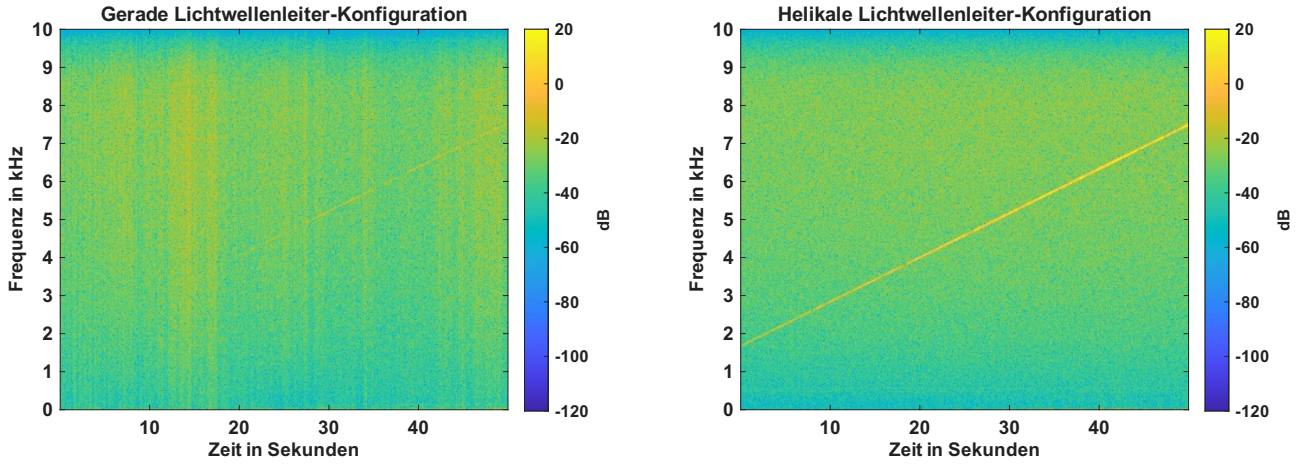


Abbildung 4: Spektrogramme der beiden Lichtwellenleiter-Konfigurationen.

Vom PC aus werden die Referenzsignale über eine Soundkarte an einen Projektor übertragen. Der Lichtwellenleiter erfasst die ausgesendeten Signale, die anschließend über das OptoDAS-System paketweise an den PC zurückgesendet werden. Dabei arbeitete die Soundkarte mit einer Abtastrate von 48 kHz. Das OptoDAS-System arbeitet mit einer Abtastrate von 20 kHz, einer räumlichen Abtastung von $dx = 1$ m und einer Gauge-Länge von $L_G = 2$ m. Der angeschlossene Lichtwellenleiter ist ein Patchkabel mit einer Gesamtlänge von 25 m, was eine Anzahl von 26 Sensoren ergibt. Projektor und Lichtwellenleiter befanden sich in einer Tiefe von 1,5 m.

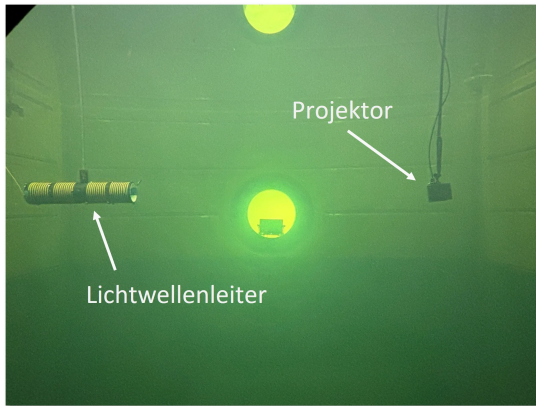


Abbildung 5: Helikaler Lichtwellenleiter und Projektor während der Messung.

Zur Untersuchung der Signalqualität in Abhängigkeit von der Einfallsrichtung wurde der Lichtwellenleiter über eine Stange an einem Motor befestigt, der eine Rotation im Bereich von 0° bis 360° ermöglicht. Die Rotation erfolgte in Schritten von $\theta_{\text{step}} = 3^\circ$, woraus sich insgesamt $n_\theta = 121$ Winkelschritte ergeben. Als Anregungssignale kamen mittelwertfreies, gleichverteiltes weißes Rauschen $z(n) \in (-1, 1)$ sowie ein Chirpsignal $x(n) \in (-1, 1)$ mit einem Frequenzverlauf von 1 kHz bis 8 kHz zum Einsatz. Beide Signale hatten eine Dauer von 60s und wurden mit Pegeln von -21 dBu beziehungsweise -26 dBu gesendet. Ergänzend wurde für beide Lichtwellenleiter-Konfigurationen jew-

eils eine Eigenrauschmessung vorgenommen, um das Umgebungsrauschen des Tanks in der Auswertung berücksichtigen zu können.

Auswertung

Für die Auswertung wurde bei beiden Lichtwellenleiter-Konfigurationen der Kanal bei 24m herangezogen, da dieser sich im Wasser befindet und innerhalb der Gauge-Länge liegt. Für den ersten visuellen Vergleich wurde das Empfangssignal des Chirpsignals analysiert, da dieses Signal eine kontinuierliche Frequenzänderung enthält. In Abbildung 4 sind die Spektrogramme der geraden und der helikalen Lichtwellenleiter-Konfiguration dargestellt. Die Ausrichtung der Messung wurde auf die Richtung $\theta = 90^\circ$ festgelegt, was bei der geraden Lichtwellenleiter-Konfiguration einer Anregung von der Breitseite entspricht. Es ist deutlich zu erkennen, dass das Chirpsignal bei der helikalen Konfiguration eine deutlich bessere Signalqualität aufweist als bei der geraden Konfiguration. Insbesondere sind die Amplituden stabiler und die Frequenzkomponenten klarer definiert. Darüber hinaus zeigt sich, dass das Hintergrundrauschen bei der helikalen Konfiguration deutlich niedriger ist, was die Signal-Rausch-Verhältnisse erheblich verbessert. Diese Beobachtung lässt darauf schließen, dass die helikale Struktur eine effektivere Abschwächung von Störsignalen und eine robustere Signalübertragung im Wasser bietet.

Um die Eigenschaften der Direktivität der beiden Konfigurationen besser analysieren zu können, wurde das Leistungsdichtespektrum nach der Welch-Methode

$$\hat{S}_{xx}(\Omega) = \frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} |X_k(e^{j\Omega})|^2 \quad (7)$$

für alle Winkel ermittelt – sowohl für den Fall, dass ein mittelwertfreies, gleichverteiltes Rauschsignal als Anregung verwendet wurde, als auch für eine Eigenrauschmessung. In Abbildung 6 ist das Ergebnis für Kanal 24 bei $\theta = 90^\circ$ für beide Konfigurationen sowie für die Eigenrauschmessung dargestellt.

Es ist zu erkennen, dass der Abstand zwischen Eigenrauschen und Anregung im Vergleich zum geraden

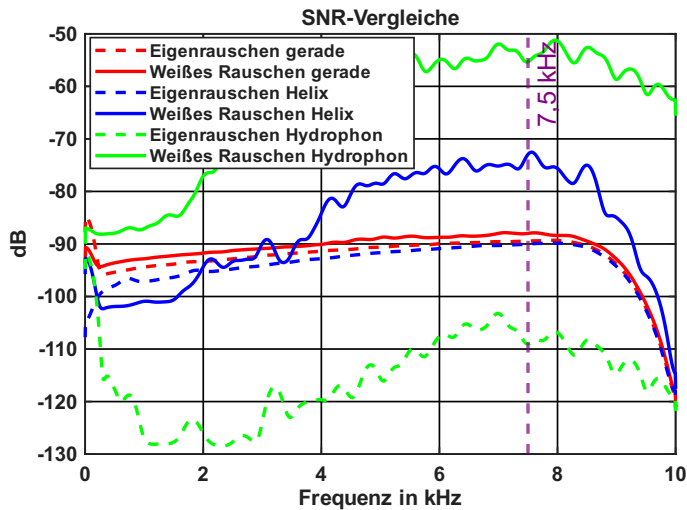


Abbildung 6: SNR Vergleiche für die Lichtwellenleiter-Konfigurationen.

Lichtwellenleiter deutlich größer ist. Betrachtet man die Frequenz von 7,5 kHz, ergibt sich ein SNR von $\text{SNR}_{\text{Helix}} = 17 \text{ dB}$. Im Vergleich zu einem konventionellen Hydrophon, das an dieser Stelle ein SNR von $\text{SNR}_{\text{Konventionell}} = 54 \text{ dB}$ aufweist, ist dieser Wert zwar deutlich geringer. Allerdings bezieht sich die Messung nur auf einen einzelnen Sensorpunkt und wurde zudem noch ohne Signalverarbeitung durchgeführt. Die Eigenrauschmessung des Hydrophons zeigt teilweise ein ungewöhnliches Verhalten, da sie zunächst abnimmt und erst anschließend wieder ansteigt. Die Ursache dafür wird derzeit noch untersucht.

Bezüglich der Direktivität der Helix ist das Ergebnis in Abbildung 7 dargestellt. Hier ist erkennbar, dass die Helix eine relativ gleichmäßige Direktivität bietet, was Messungen aus allen Richtungen ermöglicht.

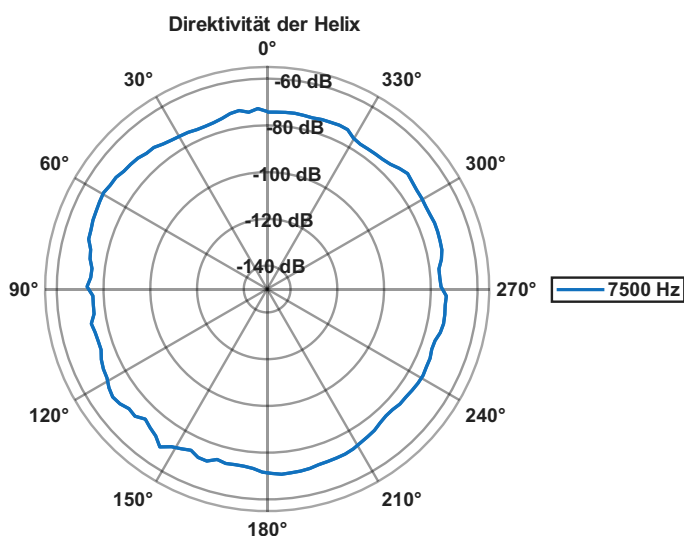


Abbildung 7: Ergebnis der Direktivitätsmessung.

Zusammenfassung und Ausblick

Andere Konfigurationen können im Vergleich zur geraden Lichtwellenleiter-Konfiguration die Qualität des

durch DAS empfangenen Signals erheblich verbessern. Es wurde gezeigt, dass die helikale Konfiguration im Vergleich zur geraden Lichtwellenleiter-Konfiguration die Signalqualität verbessert. Des Weiteren konnte gezeigt werden, dass eine Sensitivität über 360° gegeben ist.

Eine Sensitivität, wie sie in Gleichung 3 für den geraden Lichtwellenleiter bzw. in Gleichung 6 für die helikale Lichtwellenleiter-Konfiguration angegeben ist, konnte jedoch nicht direkt beobachtet werden. Ein möglicher Grund dafür ist, dass diese Gleichungen lediglich Approximationen für einen Lichtwellenleiter darstellen, der in diesem Experiment bereits ummantelt ist. Zudem ist aufgrund der Dimension des Messtanks und der Einschränkung des OptoDAS-Systems, das nur Abstände von 1 m erlaubt, eine Messung mit der geraden Lichtwellenleiter-Konfiguration schwieriger.

Bezüglich der Gleichung der helikalen Konfiguration könnte eine Abweichung auch darauf zurückzuführen sein, dass der Lichtwellenleiter auf PLA gewickelt ist, was ebenfalls die Signalqualität beeinflussen könnte. Dennoch zeigt sich, dass beispielsweise bei Schleppantennen über mehrere Meter mit einer helikalen Konfiguration mehr Sensoren entlang des Lichtwellenleiters genutzt werden können, was wiederum die Signalqualität verbessert.

In Zukunft wird untersucht, wie unterschiedliche Konfigurationen von Lichtwellenleitern die Signalqualität beeinflussen. Dabei wäre auch interessant, welchen Effekt eine zusätzliche Ummantelung sowie eine gezielte Anordnung des Lichtwellenleiters haben. Besonders relevant könnten Materialien mit hoher Poisson-Zahl ν sein, da sie eine starke Kopplung zwischen Quer- und Längsdehnung aufweisen. Ein weiterer Untersuchungsansatz wäre, inwiefern durch Beamforming adaptiert für Lichtwellenleitern ebenfalls eine Verbesserung der Signalqualität erzielt werden kann.

Danksagung

Die Arbeit wird durch die WTD 71 Wehrtechnische Dienststelle für Schiffe und Marinewaffen, Maritime Technologie und Forschung unterstützt.

Literatur

- [1] Duan, Y.; Du, S.; Chen, T.; Guo, C.; Wu, S.; Liang, L. Quantitative Analysis of Phase Response Enhancement in Distributed Acoustic Sensing Systems Using Helical Fiber Winding Technology. *Sensors* 2025, 25, 7289. <https://doi.org/10.3390/s25237289>
- [2] Jingyuan Wang, Bin Liu, Jing Zhu, Weiwei Duan. Application of distributed helically wound cable technology in ground seismic exploration. *Journal of Seismic Exploration* 2025, 34(4), 18–27. <https://doi.org/10.36922/JSE025300040>