ВОЛОКОННЫЕ ЛАЗЕРЫ С НИЗКИМ УРОВНЕМ ШУМА ДЛЯ ОПТИЧЕСКИХ СЕНСОРНЫХ СИСТЕМ

С.Ловгрин, NKT Photonics ,sl@nktphotonics.com

Одночастотные волоконные лазеры серии Koheras с уровнем выходной мощности от 10 мВт до 15 Вт, излучающие в диапазоне от 1 до 1,5 мкм длин волн, удовлетворяют критериям многих сенсорных систем. В обнаружении вихревых следов самолета, охране трубопроводов, транспортировке жидкостей и газов, ветровой анемометрии, – везде востребованы их беспрецедентные характеристики: узкая линия излучения, низкий уровень шума, компактность и надежность.

Датская компания NKT Photonics с 1997 года занимается производством малошумящих одночастотгых волоконных лазеров для глобальных исследовательских лабораторий, интеграторов оптических систем зондирования для космической и оборонной промышленности. Сегодня наибольшая доля волоконных лазеров используется в интерференционных оптических системах зондирования для добычи нефти и газа, контроля целостности трубопровода, охраны периметра и определения скорости ветра. Низкий фазовый шум (рис.1) и стабильность, свобода от эффекта mode-hop* в одночастотном режиме функционирования и субкилогерцевая ширина линии являются ключевыми техническими характеристиками, которые позволяют использовать оптические волокна длиной в десятки километров с высокой чувствительностью и точностью.

Волоконный лазер выполнен по схеме с распределенной обратной связью (DFB – Distributed Feed-Back) и имеет, по существу, надежный лазерный резонатор. Высокая добротность и относительно большая длина резонатора DFB в сочетании с большим времен жизни ионов редкоземельных

* Эффект mode-hop – внезапные скачки частоты излучения, часто провоцируемые воздействием внешних факторов. Например, в лазерных диодах дрейф температуры активной среды ведет к сдвигу длины волны максимального усиления.

LOW NOISE FIBER LASERS IN OPTICAL SENSING

S.Løvgreen, NKT Photonics ,sl@nktphotonics.com

Single-frequency fiber lasers of Koheras series with output power from 10mW to 15W emitting wave lengths from 1 to 1.5μm match many sensor systems criteria. Detection of aircraft wake vortex, piplines protection, liquid and gas transportation all need their unique characteristics, fine radiation line, low noise, small size and reliability

The Danish company NKT Photonics has been manufacturing low noise single frequency fiber lasers since 1997 for global research laboratories, optical sensing system integrators, and for the space and defense industry. Today the largest share of the fiber lasers is deployed in interferometric optical sensing systems for oil and gas exploitation, pipeline integrity monitoring, perimeter security and wind detection. The low phase noise (figure 1) and stable, mode-hop free single frequency laser operation and sub kHz linewidth are the key technical attributes that enable interrogation of optical fibers over tens of kilometers with high sensitivity and accuracy.

The fiber laser is a so-called DFB (Distributed Feed-Back) design, and is essentially a short and robust laser cavity. The high Q-value and the relatively long length of the DFB cavity combined with long radiative lifetimes of rare earth ions in silica provide for fundamentally low values of phase noise and spectral linewidth. Careful packaging design to reduce effects of vibrations and acoustic noise and use of low noise pump sources further reduce effects of technical noise. The end result is a laser source that combines ease of use, low power consumption, and compact size with values for phase noise and spectral linewidth that are unsurpassed in its class.

Fiber optical sensing systems are gaining ground these days because they offer several advantages over traditional technologies based on electrical transducers such as piezo electric hydrophones as they are passive i.e. no electronics, compact, lightweight, reliable, and can be multiplexed to interrogate very large sensor arrays, as well as enable longer sensing ranges with high dynamic range and sensitivity.

In an interferometic optical sensing system based on e.g. coherent Rayleigh backscatter detection, the optical fiber typically acts as a long continuous sensor that is extremely sensitive to acoustic perturbations from the surroundings. The small impacts cause a

металлов в кремнии обеспечивают принципиально низкие значения фазового шума и узкую ширину спектральной линии излучения. Тщательный дизайн упаковки для уменьшения эффекта вибрации и акустических шумов и использование источников накачки с низким шумом ведут к снижению последствий технического шума. Конечным продуктом является лазерный источник, который сочетает в себе простоту использования, низкое энергопотребление, низкие массогабаритные характеристики и непревзойденные в своем классе величины фазового шума и ширины спектральной линии.

В наши дни системы оптического зондирования на основе волоконных датчиков укрепляют свои позиции. Для этого у них есть все основания в виде ряда преимуществ перед традиционными технологиями на основе электрических преобразователей пьезоэлектрических гидрофонов. Они пассивны, то есть не являются электрическими изделиями, компактны, имеют малый вес, надежны и могут быть легко мультиплексированы в очень большие массивы датчиков, благодаря высокой чувствительности в большом динамическом диапазоне. В интерферометрических системах оптического зондирования, построенных, например, на базе когерентного детектирования обратного рассеяния Рэлея, оптическое волокно, как правило, выступает в качестве длинного непрерывного датчика, который чрезвычайно чувствителен к акустическим возмущениям окружающей средой. Маленькие воздействия вызывают изменение длины оптического пути в волокне. И когда на фотодетектор попадают когерентно сложенные сигналы зондирующего и эталонного излучения от самого лазерного источника (гетеродинная согласованная схема обнаружения), то на нем появляются "отпечатки пальцев" акустических изображений. Затем с помощью математической обработки можно предоставить подробную информацию о произошедшем событии и определить место его расположения вдоль волокна. Для наблюдения периметра оптические системы используют сложные алгоритмы подавления фонового шума, который может возникнуть в результате таких посторонних источников, как дождевые капли или порывы ветра. Так что сигнал тревоги срабатывает только в соответствии с появлением потенциально критических событий.

В нефтяной и других отраслях промышленности, таких как транспортировка воды или сточных вод по длинным маршрутам трубопроводных

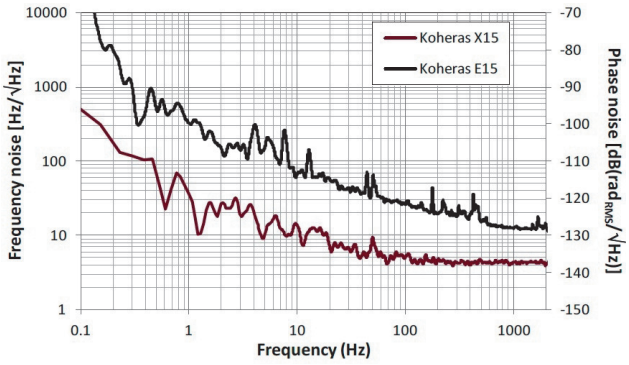

Рис.1. *Частотные характеристики волоконного лазера Koheras X15, предназначенного для промышленной индустрии*

change of the optical path length in the fiber and when interrogated by coherent laser light and re-combined with an “un-impacted” reference light from the laser source itself (local oscillator in coherent detection scheme) on a photo-detector, an acoustic “fingerprint” is depicted by means of data processing to provide detailed information about an event at a specific location along the fiber. For perimeter surveillance the optical systems use sophisticated algorithms to discriminate background noise that can arise from such sources as from rain droplets or aircrafts, so that alarms are triggered only by relevant and potentially critical events.

In the oil industry and other industries such as water and waste water transportation over long range pipe lines, the integrity and health condition of the pipe lines is very critical. Due to their economic importance these pipe lines are also potential targets for intrusion, and furthermore mechanical cracks and fatigue can lead to enormous spills with severe economic and environmental consequences. Interferometric optical sensing systems offer preventive and accurate means to detect incidents or emerging mechanical failures so precautions can be taken at an early stage.

The increasing need for optimizing oil recovery, controlling the flow of oil through pipelines, monitoring the health condition of pipelines, and protecting critical assets has also created a demand for optical sensor systems and subsequently for low noise laser sources. Oil extraction has become more challenging today as existing reservoirs produce less oil. Presently only about one fourth of an oil well is exploited over time. However, with permanent reservoir monitoring it is possible to better locate and follow the movement of oil, something which helps to improve the exploitation of an existing well and benefit from

линий, очень важное значение имеют целостность и состояние трубопроводов. В связи с экономической значимостью эти трубопроводы также являются потенциальными мишенями для вторжения. Кроме того, механические трещины и усталость могут приводить к огромным разливам транспортируемых продуктов с серьезными экономическими и экологическими последствиями. Интерферометрические оптические системы зондирования предлагают профилактические и точные средства для обнаружения инцидентов или возникающих механических повреждений. Ведь при этом меры предосторожности могут быть приняты еще на ранней стадии.

Растущая потребность в оптимизации добычи нефти, регулировании ее потока через трубопроводы, в мониторинге состояния трубопроводов и защите критически важных активов повышает спрос на системы оптических датчиков. А это ведет к росту потребности в малошумящих лазерных источниках. Добыча нефти стала более сложной, и сегодня существующие скважины дают меньше нефти. В настоящее время только около четверти нефтяных скважин эксплуатируются в течение долгого времени. Тем не менее, проводя постоянный мониторинг скважин, можно улучшить поиски нефти и следить за ее движением. Оптический мониторинг это то, что помогает улучшить эксплуатацию существующей инфраструктуры вокруг нефтяной скважины и извлечь выгоду из начальных вложенных в нее инвестиций. В качестве примера вспомним, что в датском нефтяном секторе один дополнительный процент добычи нефти из недр соответствует совокупной стоимостью 1 млрд. долл. [1]. Оптоволоконные лазеры с низким шумом в настоящее время развернуты в разных местах среди больших массивов нефтяных гидрофонных сенсоров. Они помогают найти нефть, снимая отраженные от морского дна акустические сигналы, порожденные звуковыми волнами от крупных пневматических зондов (рис.2).

На ближайшие годы запланировано проложить еще множество подводных зондирующих систем. В настоящее время проложены волоконно-оптические наземные системы, ведущие рассчеты на основе геосейсмических подсчетов (около 1 млн. каналов). Для всех них шум является ключевым параметром определения производительности системы для получения надежных данных и четких изображений, и в этой игре лазерный фазовый шум играет центральную роль. Поэтому продолжающееся развитие волоконно-оптических

Рис.2. *Морская нефтедобывающая платформа (источник: www.nktphotonics.com/ oil_and_gas)*

the initial infrastructure investment around an oil reservoir. By way of example, in the Danish oil sector a single additional percentage of oil extraction from the underground corresponds to a gross value of 1b USD [1]. Low noise lasers are now being deployed at different oil fields to interrogate large fiber optic hydrophone arrays that pick up reflected acoustic signals from below the seafloor, generated by sound waves from large air guns, to help locate the oil (fig.2).

More sub-sea systems are planned for the coming years, and currently fiber optic land based geo-seismic systems with very high channel counts (towards 1 million channels) are also being investigated. For all these systems noise is a key performance parameter to obtaining solid data and clear images, and in this game the laser phase noise plays a central role. The continued development of fiber optic geo-seismic systems therefore has helped push the laser technology towards compact, fiber coupled, high reliability devices with un-surpassed low phase noise performance.

Koheras lasers also play an important role in a new generation of wind sensing Lidars (Light Detection and Ranging) for meteorology where the Doppler shift of light scattered by aerosols (Mie scattering) is used to indirectly measure wind velocity and turbulence by coherent homodyne detection. It requires first of all a single frequency, narrow linewidth source that can deliver up to 1 W of optical power, but also very low RIN (Relative Intensity Noise) to be able to detect the very weak back scatter from aerosols and particles carried by the wind. The laser emits light in an eye safe wavelength region at 1.5 µm not causing eye damage to humans or animals.

геосейсмических систем помогает подтолкнуть лазерные технологии к созданию компактных волоконных устройств с непревзойденно низким фазовым шумом.

Лазеры Koheras играют важную роль в новом поколении лазерных дальномеров. Лидары для зондирования ветряных потоков используются в метеорологии, где доплеровский сдвиг света, рассеянного аэрозолями (рассеяние Ми), используется для косвенного измерения скорости ветра и турбулентности. Это требует, прежде всего лазерных источников, излучающих на одной частоте, с узкой линией и оптической мощностью до 1 Вт, но при этом с очень низким относительным шумом (RIN относительная интенсивность шума). Такие требования необходимы, чтобы датчик был в состоянии обнаружить очень слабые сигналы, рассеянные назад аэрозолями и частицами, переносимыми ветром. Лазер излучает свет в диапазоне длин волн безопасного полета на длине 1,5 мкм, что не вызывает повреждение глаз человека или животного.

Использование лазерной анемометрии будет иметь важное значение для будущего управления альтернативными источниками энергии на основе энергии ветра. И это важно для успеха ветровых проектов. Данные о ветре традиционно собирались с помощью дорогостоящих анемометров, которые выполняют только точечные измерения. Это создает большие трудности в связи с необходимостью иметь данные с многочисленных точек на протяжении всего потока ветра. К тому же известно, что для установки анемометров мачтового типа требуется дополнительное разрешение на строительство и получение сертификата безопасности для здоровья окружающих.

Ветряные лидары в настоящее время используются в качестве датчиков для прогноза ветровых потоков, образующихся впереди ветровых турбин при их эксплуатации (рис.3). Они имеют ряд преимуществ перед традиционными анемометрами, такими как широко используемые чашечные анемометры, которые ограничены в возможности мгновенных измерений, или перед сонарами, которые предсказывают скорость потока ветра, но с низкой точностью. Возможность достоверно предсказать скорость и направление ветра, как ожидается, станет очень полезным инструментом в отрасли ветряных турбин. Этой отрасли потребуется информация для контроля и поиска высоты с целью оптимизации энергопотребления. И, что еще более важно, потребность в такой информации объясняется необходимостью снижения

The use of laser anemometry will be important for future wind resource management as the accurate prediction of energy yield is vital to the success of wind farm projects. Wind data have traditionally been collected using expensive anemometry masts, which are expensive and further only perform point measurements. This creates great difficulty due to the numerous measurement points throughout the entire wind farm and in addition raising anemometry masts require building permits and dealing with health and safety aspects.

Wind Lidars are now being exploited as forward looking sensors to predict wind conditions ahead of wind turbines in operation, as opposed to traditional and widely used cup anemometers that are limited to instantaneous measurements at the turbine nacelle, or sonars which do predict the wind conditions ahead, however with low accuracy (fig.3). The ability to reliably predict the wind speed and direction is expected to be a very useful tool in the wind turbine

Рис.3. *Ветрогенераторы в открытом море (Источник: www.nktphotonics.com/lidar)*

нагрузки и определения усталости больших турбинных структур. Это может привести к новым разработкам в дизайне строительства, управлении, эксплуатации и жизнеобеспечении, и в конце концов сводится к стоимости владения для владельцев активов. Типичное время жизни ветровых турбин – около 20 лет, но при правильном использовании в их управлении информации от ветряных лидаров возсожно продлить этот срок на 30%. В результате будут снижены нагрузки на турбины от турбулентных вихрей [2].

Другие приложения, которые могут извлечь выгоду от использования ветровых лидаров, это обеспечение безопасности полетов и обнаружения вихревого следа на посадочных площадках в аэропортах. NKT Photonics тесно сотрудничает с ведущим мировым научно-исследовательским центром по изучению энергии ветра – Risø DTU National Laboratory for Sustainable Energy (Национальной лабораторией по устойчивому развитию энергетики). Компания получила ноу-хау в области определния требований, предъявляемых к лазерам для обеспечения рабочего цикла ветряных турбин с помощью ветряных лидаров.

Лазеры Koheras играют важную роль в прорывных научных проектах, осуществляемых по всему миру, например в работе миссии Swarm европейского космического агентства. Задача спутника, запущенного в ноябре 2013 года, – разгадать один из самых загадочных аспектов нашей планеты – магнитное поле [3] (рис.4). Лазеры компании Koheras не были первоначально предназначены для установки на спутниках, но в конце 90-х годов появилось решение их использовать. Этот проект – свидетельство тому, что волоконный лазер способен удовлетворить самым взыскательным требованиям космической отрасли. Таким образом, он работает в соответствии с высокими стандартами, заложенными в индустрии оптического зондирования.

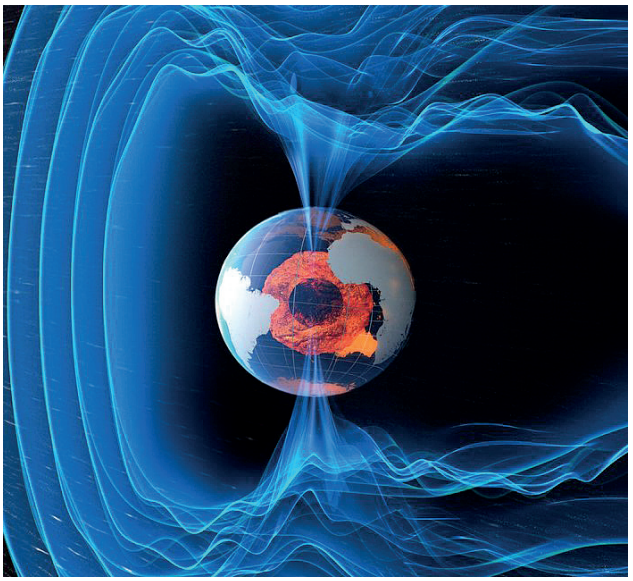

Рис.4. *Магнитное поле Земли (источник: ESA, www.esa.int)*

ЛИТЕРАТРУА

1. http://videnskab.dk/kort-nyt/ny-laserbaseret-vindmaling-kan-forlaenge-vindmollers-levetid
2. http://hoejteknologifonden.dk/nyheder/nyhedsoversigt/ny_laserbaseret_vindmaaling_kan_forlaenge_vindmoellers_levetid/
3. http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/The_Living_Planet_Programme/Earth_Explorers/Swarm/Preparing_to_launch_Swarm & http://smsc.cnes.fr/SWARM/premiere_mondiale.htm

Статья публикуется с разрешения редакции журнала LaserFocusWord

industry to control the pitch and yaw for increased power optimization and even more importantly reduce load and fatigue of the large turbine structures. This could lead to new developments both in the construction design, farm site management, as well as operation and service lifetimes, and in the end reduced cost of ownership for the asset owners. The typical life time of wind turbines is around 20 years, but it is expected that it could be extended by 30% using wind Lidar feedback control to reduce the loads from wind turbulence [2].

Other applications that can benefit from wind Lidars is aviation safety and airport wake vortex detection at landing fields. NKT Photonics has worked closely with the world leading research center in wind energy, Risø DTU National Laboratory for Sustainable Energy, and gained know-how of the laser requirements to make the fiber lasers suitable sources for wind Lidars.

Koheras lasers are also vital for important scientific projects around the world, for example for ESA's Swarm mission scheduled for launch in November 2013 that will unravel one of the most mysterious aspects of our planet, the magnetic field [3] (fig.4). The Koheras laser was not originally intended to be space-born and installed on satellites when commercialized in the late 90's, however this project is a good testimony of how the fiber laser is also capable of meeting the demanding requirements of the space industry and thus certainly live up to the high standards in the optical sensing industry.