ТЕХНИЧЕСКИЙ ОБЛИК СУДОВОГО ДВУХВОЛНОВОГО ФЛУОРЕСЦЕНТНОГО ЛИДАРА

Федотов Ю.В.[1,2], Животовский И.В.[1,2], Селиверстова С.В.[1,2], Перковский Р.А.[2,3], Озолин Д.В.[1]

[1]ООО «Инновационный инжиниринговый центр» г. Москва, Россия

[2]Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия

[3]АО «Лаборатория Электроники», г. Москва, Россия

e-mail: fed@bmstu.ru, ivj@bmstu.ru, sofyaseliverstova@gmail.com, roman@ellab.ru, dmitrij.ozolin@innosol.ru

Представлены результаты технического проектирования судового двухволнового флуоресцентного лидара для дистанционного зондирования морской среды. Устройство использует возбуждение на длинах волн 355 и 532 нм, что позволяет эффективно разделять вклад различных веществ (хлорофилла, органического вещества, загрязнений) в сигнал флуоресценции. Описана структурная схема лидара. Приведены основные технические параметры комплекса.

Ключевые слова: судовой лидар, флуоресценция, многоволновый, дистанционное зондирование, морская поверхность

Мировой океан играет ключевую роль в формировании климата, обеспечении ресурсами и экономической деятельности человечества [1]. Мониторинг состояния Мирового океана необходим для обеспечения экологической, экономической и геополитической устойчивости [2]. Методы дистанционного зондирования позволяют вести наблюдения мировой акватории в глобальном масштабе. Лидары представляют собой один из наиболее эффективных инструментов для дистанционного исследования поверхности и приповерхностного слоя океана. Их главное преимущество заключается в способности получать результаты зондирования быстро и с высоким разрешением. Флуоресцентные лидары позволяют проводить картирование содержания фитопланктона (по результатам измерения концентрации хлорофилла а) [3,4], окрашенного растворенного органического вещества [5], общего взвешенного вещества [6] в поверхностном слое моря. С помощью флуоресцентных лидаров возможно эффективное обнаружение нефтяных загрязнений на морской поверхности [7].

В настоящей работе изложены результаты разработки технического облика судового двухволнового флуоресцентного лидара, обеспечивающего решение широкого спектра задач при зондировании морской поверхности. Особенностью данного лидара является использование излучения на двух длинах волн (355 и 532 нм) для возбуждения флуоресценции. Применение двух длин волн позволяет более эффективно возбуждать флуоресценцию различных веществ растворенных в морской воде [8], а также "разделить" вклад в излучение флуоресценции от различных веществ [9]. Разрабатываемый лидар предназначен для измерения спектрального (в диапазоне 355 – 700 нм с шагом 11 нм) и временного (с шагом 5 нс)

распределения регистрируемого излучения. Частота зондирований составляет 20 Гц, что позволяет с высоким разрешением строить карты пространственной изменчивости измеряемых параметров.

Структурная схема флуоресцентного лидара представлена на рисунке 1. В качестве источника излучения используется диодно-накачиваемый Nd:YAG лазер с генератором второй и третьей гармоник. С использованием сепараторов гармоник (дихроические зеркала) и электромеханических затворов реализован оптический переключатель, позволяющий выбрать дину волны возбуждающего излучения. Дополнительный сепаратор гармоник и фотодиоды служат для измерения мощности лазерного излучения. Передающие объективы уменьшают расходимость лазерного излучения и снижают плотность мощности излучения во избежание оптического пробоя на выходных окнах лидара.

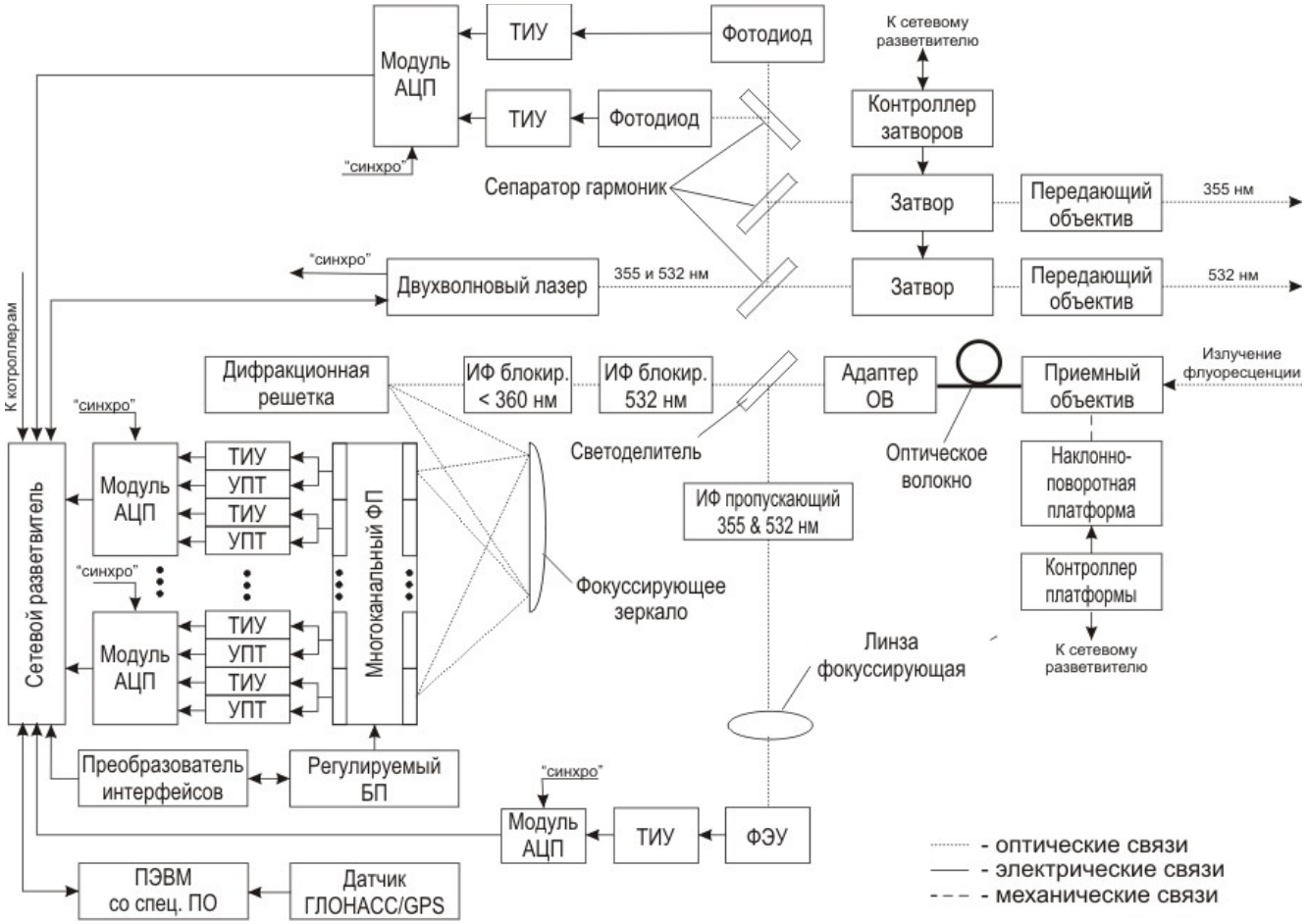

Рисунок 1 – Структурная схема лидара (ИФ - интерференционный фильтр, ТИУ - трансимпедансный усилитель, УПТ - усилитель постоянного тока, БП - блок питания, ПО - программное обеспечение, ОВ – оптическое волокно)

Для сбора излучения флуоресценции используется зеркальный объектив Кассегрена с эффективным диаметром входной апертуры 68 мм. Спектральная селекция излучения флуоресценции осуществляется с помощью интерференционных фильтров, подавляющих излучение на длинах волн возбуждающего излучения, и отражательной дифракционной решетки. Регистрация излучения осуществляется высокочувствительным 32-канальным фотоприемником (ФП). Выход каждого канала фотоприемника подключен трансимпедансному усилителю (ТИУ) с полосой 100 75 МГц, коэффициент усиления каждого трансимпедансного усилителя управляется программно в соответствии с величиной регистрируемых в данном канале сигналов. Усилители постоянного тока используются для контроля среднего фототока в каждом канале ФП, а также используются при калибровке лидара по длине волны и чувствительности. Для преобразования сигналов в цифровую форму используются 14-битные АЦП с частотой квантования 200 МГц. Для регистрации упруго рассеянного излучения используется отдельный канал на основе фотоэлектронного умножителя (ФЭУ). Сигналы с АЦП передаются на ПЭВМ по интерфейсу Ethernet через сетевой разветвитель. Приемный объектив установлен на моторизованной наклонно-поворотной платформе, что позволяет изменять геометрический фактор лидара в зависимости от дальности до поверхности воды, что позволяет подстраивать динамический диапазон системы регистрации под уровень принимаемых сигналов. Основные параметры разрабатываемого флуоресцентного лидара приведены в таблице 1.

Таблица 1. Основные параметры лидара

Параметр	Значение
Длины волн возбуждающего изучения, нм	355 и 532
Энергия импульса на длине волны 355 нм, мДж	не менее 20
Энергия импульса на длине волны 532 нм, мДж	не менее 20
Длительность импульса, нс	не более 10
Расходимость лазерного излучения, мрад	не более 1
Частота повторения импульсов, Гц	20
Эффективный диаметр приемного объектива, мм	68
Спектральный диапазон регистрируемого излучения, нм	355 - 700
Число спектральных каналов	33
Ширина спектрального, нм	~11
Длина элемента разрешения по дальности в морской среде, м	~1,1
Разрядность АЦП, бит	12

1. *Mohd Azim Sardan, Ali N.M., Ali A., Samsudin A., Harun N.F.A., Tan Y.-L., Kadir J.M.A.* Blue economy and food security the way forward : A systematic literature review analysis // Int. J. Asian Soc. Sci. 2023. V. 13, N. 9. P. 271–281.
2. *Tanhua T., Mccurdy A., Fischer A., Appeltans W., Bax N., Currie K., Deyoung B., Dunn D., Heslop E., Glover L.K., Miloslavich P., Moltmann T., Nolan G., Palacz A.* What We Have Learned From the Framework for Ocean Observing : Evolution of the Global Ocean Observing System // Front. Mar. Sci. 2019. V. 6, N. August. P. 1–18.
3. *Hoge E.F., Swift N.R.* Airborne dual laser excitation and mapping of phytoplankton photopigments in a Gulf Stream Warm Core Ring // Appl. Opt. 1983. V. 22. P. 2272–2281.
4. *Palmer S.C.J., Pelevin V. V., Goncharenko I., Kovács A.W., Zlinszky A., Présing M., Horváth H., Nicolás-Perea V., Balzter H., Tóth V.R.* Ultraviolet fluorescence LiDAR (UFL) as a measurement tool for water quality parameters in turbid lake conditions // Remote Sens. 2013. V. 5, N. 9. P. 4405–4422.
5. *Rogers S.R., Webster T., Livingstone W., O'Driscoll N.J.* Airborne Laser-Induced Fluorescence (LIF) Light Detection and Ranging (LiDAR) for the Quantification of Dissolved Organic Matter Concentration in Natural Waters // Estuaries and Coasts. 2012. V. 35, N. 4. P. 959–975.
6. *Zavialov P.O., Pelevin V. V, Belyaev N.A., Izhitskiy A.S., Konovalov B. V, Krementskiy V. V, Goncharenko I. V, Osadchiev A.A., Soloviev D.M., Garcia C.A.E., Pereira E.S., Sartorato L., Moller O.O.* High resolution LiDAR measurements reveal fine internal structure and variability of sediment-carrying coastal plume // Estuar. Coast. Shelf Sci. Elsevier Ltd, 2018. V. 205. P. 40–45.
7. *Zhang S., Yuan Y., Wang Z., Li J.* The application of laser-induced fluorescence in oil spill detection // Environ. Sci. Pollut. Res. Springer Berlin Heidelberg, 2024. V. 31, N. 16. P. 23462–23481.
8. *Салюк П.А., Дорошенков И.М., Клюгер К.С., Букин О.А., Крикун В.А., Майор А.Ю.* Флуоресценция растворенных органических веществ в дальневосточных морях при многочастотном возбуждении // Оптика атмосферы и океана. 2013. V. 26, N. 4. P. 286–290.
9. *Liu R., Ling Q., Zhang Q., Zhou Y., Le C., Chen Y., Liu Q., Chen W., Tang J., Liu D.* Detection of Chlorophyll a and CDOM Absorption Coe ffi cient with a Dual-Wavelength Oceanic Lidar : Wavelength Optimization Method // Remote Sens. 2020. V. 12, N. 3021. P. 1–15.