

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗОНЫ ЛОКАЦИИ НЕПРЕРЫВНОГО МОНОСТАТИЧЕСКОГО ДОПЛЕРОВСКОГО ЛИДАРА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВЕТРА

Д.В. Васильев¹, А.И. Ларюшин²

¹АО «Раменский приборостроительный завод»

²АО «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха

vasiliev1969@yandex.ru

Резюме: Рассматривается применение полупроводниковых источников излучения с шириной спектра десятки кГц в технике непрерывных доплеровских лидаров. Анализируется влияние характеристик источников на формирование зоны локации. Для учета конструктивных параметров полупроводникового источника, а также чувствительной площадки фотоприемного устройства зондирующий и опорный каналы лидара представляются как системы построения изображений протяженных когерентных источников. Построение зоны локации рассматривается как наложение сформированных с учетом размеров излучающей поверхности источника и чувствительной площадки приемника поперечных изображений полей каналов. Предлагаемый метод расчета, основанный на выражении принципа Гюйгенса–Френеля для протяженных когерентных источников, позволяет учесть характеристики спектра излучения, оптической системы, атмосферы, размеры плоской излучающей поверхности источника и чувствительной площадки приемника. Результаты метода расчета зоны локации подтверждаются натурным экспериментом определения параметров воздушного потока.

Ключевые слова: протяженный когерентный источник, зона локации, метод Гюйгенса–Френеля, дальность фокусировки, зондирующий канал лидара, опорный канал лидара, разъюстировка каналов, ширина спектра, метеовидимость.

MODELING CONTINUOUS AREA LOCATION MONOSTATIC DOPPLER LIDAR DETERMINING WIND PARAMETERS

D.V. Vasiliev*, A.I. Laryushin**

*Chief Designer of «Ramenskoye Instrument Plant»

**"Research Institute" Polyus "them. M.F. Stelmakh.

vasiliev1969@yandex.ru

Abstract: The application of semiconductor light sources with a spectral width of tens of kilohertz in the art of continuous Doppler lidar. The influence of the source characteristics of the formation of the zone location. To take into account the design parameters of a semiconductor source and sensitive area photodetector probe and reference channels are represented as lidar imaging system of extended coherent sources. Building location area is regarded as the imposition formed taking into account the size of the radiating surface of the source and the receiver of the sensitive area of the transverse channel image field. The proposed calculation method based on the expression of the principle of Huygens - Fresnel for long coherent sources, allows to take into account the characteristics of the emission spectrum of the optical system, the atmosphere, the size

of the flat radiating surface of the source and receiver sensitive area. Results location area calculation method are confirmed by field experiments determining air flow parameters.

Keywords: The long coherent source, location area, the method of the Huygens - Fresnel range of focus, sounding lidar channel, reference channel lidar, misalignment of channel width of the spectrum, meteoroidism.

Введение

Развитие полупроводниковых источников излучения открывает новые возможности их применения в технике непрерывных моностатических доплеровских лидаров (далее НМДЛ). Конструктивные особенности источников требуют учета их влияния на формируемое поле излучения. Эти вопросы рассматриваются в статье.

Метод расчета

Для учета конструктивных параметров полупроводникового источника, а также чувствительной площадки фотоприемного устройства зондирующий и опорный каналы лидара представляются как системы построения изображений протяженных когерентных источников. Зона локации при этом формируется оптической системой (далее ОС) как наложение сформированных с учетом размеров излучающей поверхности источника и чувствительной площадки приемника поперечных изображений полей каналов. Предлагаемый метод расчета позволяет учесть характеристики спектра излучения, оптической системы, атмосферы, размеры плоской излучающей поверхности источника и чувствительной площадки приемника. В методе использовано выражение принципа Гюйгенса–Френеля для протяженного когерентного источника [1, 2, 3, 4, 5]. Для произвольной точки области изображения с координатами (x_1, y_1, z_1) пояснено рис. 1.

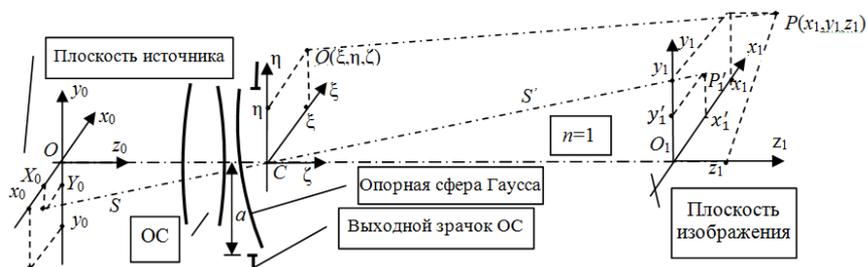


Рис.1. Построение изображения протяженного когерентного источника оптической системой канала лидара: x_0, y_0, z_0 – координаты в пространстве источника; x_1, y_1, z_1 – координаты в пространстве изображения; ξ, η, ζ – координаты в пространстве выходного зрачка оптической системы; S – расстояние от плоскости источника до плоскости выходного зрачка; S' – расстояние от плоскости выходного зрачка до плоскости изображения; n – показатель преломления среды; a – радиус выходного зрачка

Результаты моделирования

Проведено моделирование зоны локации. Результаты исследования влияния на ее формирование параметров оптической системы, разъюстировки каналов, ширины спектра показаны на рис. 2 – 5.



Рис. 2. Зона локации вдоль оси на дистанции 100 м (радиус антенны 50 мм, абберации одного знака и модуля для обоих каналов, ширина спектра $\Delta\nu = 10$ кГц): h – волновая абберация оптической системы; λ – длина волны излучения; $Z_{13, \Gamma}$ – координата вдоль оптической оси для зондирующего и опорного (гетеродинного) каналов; I^* – интенсивность интерференции излучений опорного и зондирующего каналов в пространстве изображений



Рис. 3. Зона локации вдоль оси при продольной ($\Delta s = S'_r - S'_z$) разъюстировке (радиус антенны 50 мм, оптическая система без аббераций, ширина спектра $\Delta\nu = 10$ кГц, $S'_z = 100$ м): 1 – 0 м; 2 – 1 м; 3 – 2 м; 4 – 3 м; 5 – 4 м; 6 – 5 м; Z_{13} – координата вдоль оптической оси для зондирующего канала; I^* – интенсивность интерференции излучений опорного и зондирующего каналов в пространстве изображений

Влияние аббераций одного знака для обоих каналов лидара на формирование зоны локации меньше в $\approx 1,5$ раза, по сравнению с случаем применения оптических систем с абберациями противоположных знаков. Допустимым значением волновой абберации каждого из каналов можно считать величину не более $\lambda/4$ (высокое качество оптической системы) [6]. Влияние ширины спектра излучения лазера [7] на формирование зоны локации возрастает с увеличением дальности локации: чем больше дальность – тем уже должен быть спектр для сохранения уровня эффективности гетеродинирования. Распределение интенсивности рабочего сигнала на разностной частоте в зоне локации на дальности фокусировки 50, 100, 300 и 500 м (для $R=50$ мм) в зависимости от метеовидимости [8] (далее МДВ) показано на рис. 6.



Рис. 4. Зона локации поперек оптической оси при поперечной (Δy , %) разьюстировке (радиус антенны 50 мм, оптическая система без aberrаций, ширина спектра $\Delta \nu = 10$ кГц, $S'_3 = S'_r = 100$ м): 1 – 0%; 2 – 35%; 3 – 50%; 4 – 75%; 5 – 100%; $y_{13, Г}$ – координата поперек оптической оси для зондирующего и опорного (гетеродинного) каналов; I^* – интенсивность интерференции излучений опорного и зондирующего каналов в пространстве изображений

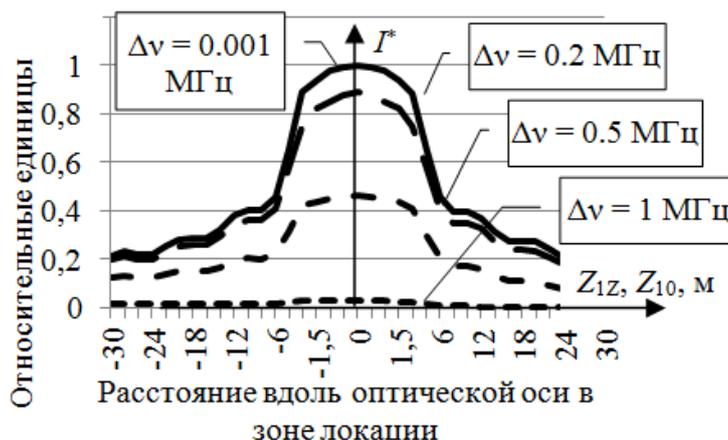


Рис. 5. Зона локации вдоль оптической оси при изменении ширины спектра (радиус антенны 50 мм, оптическая система без aberrаций, $S'_3 = S'_r = 200$ м): $\Delta \nu$ – ширина спектра; $Z_{1Z, 0}$ – координата вдоль оптической оси для зондирующего и опорного (гетеродинного) каналов; I^* – интенсивность интерференции излучений опорного и зондирующего каналов в пространстве изображений

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что лидар с антенной радиусом 50 мм обеспечивает формирование зоны локации при дальности фокусировки: $F \leq \text{МДВ}$ для $\text{МДВ} \geq 100\text{м}$; для $\text{МДВ} \leq 100\text{м}$, формирование зоны локации обеспечивается для фокусировки до дальностей, превышающих МДВ [9, 10, 11].

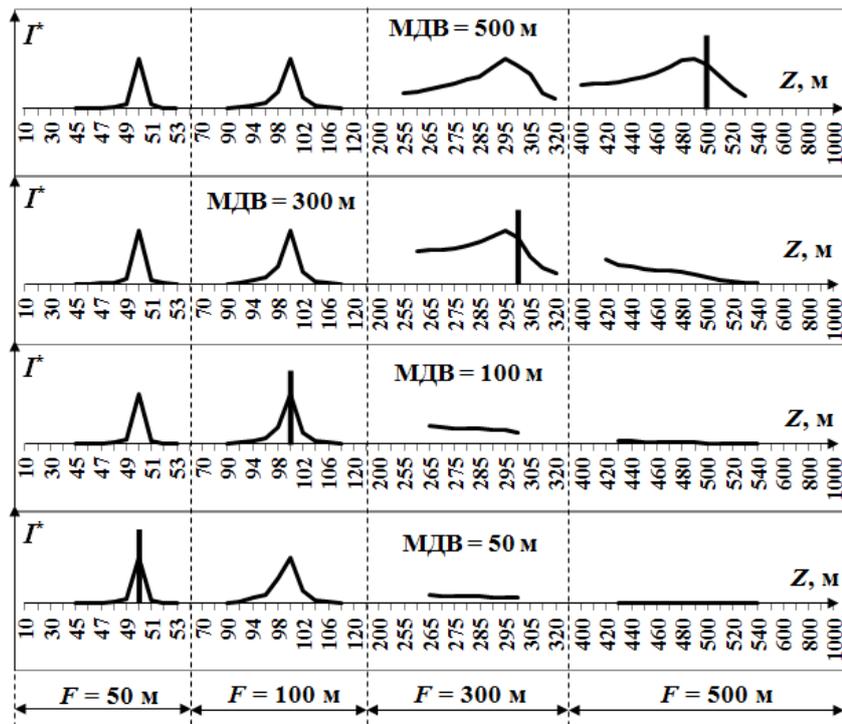


Рис. 6. Формирование зоны локации при разной дальности фокусировки и метеовидимости: I^* - интенсивность интерференции излучений опорного и зондирующего каналов в пространстве изображений; F - дальность фокусировки; Z - расстояние вдоль оптической оси лидара

Экспериментальное лоцирование

Теоретические результаты подтверждаются результатами натурального эксперимента по лоцированию воздушного потока с зонами разной степени турбулентности. На рис. 7, 8, 9 показаны схема лоцирования, точность определения скорости ветра по спектру сигнала и спектры сигналов для разных зон турбулентности.

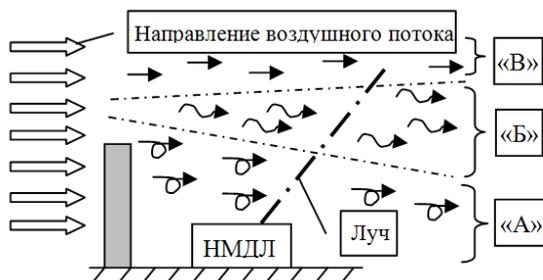


Рис.7. Схема лоцирования воздушного потока: А – зона интенсивной турбулентности; Б – зона умеренной турбулентности; В – зона малой турбулентности

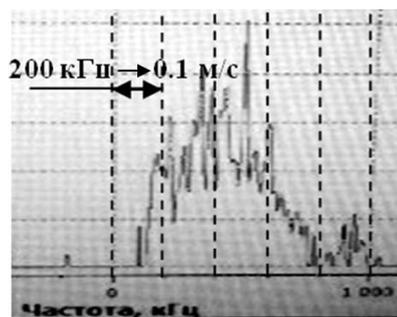


Рис. 8. Спектр сигнала

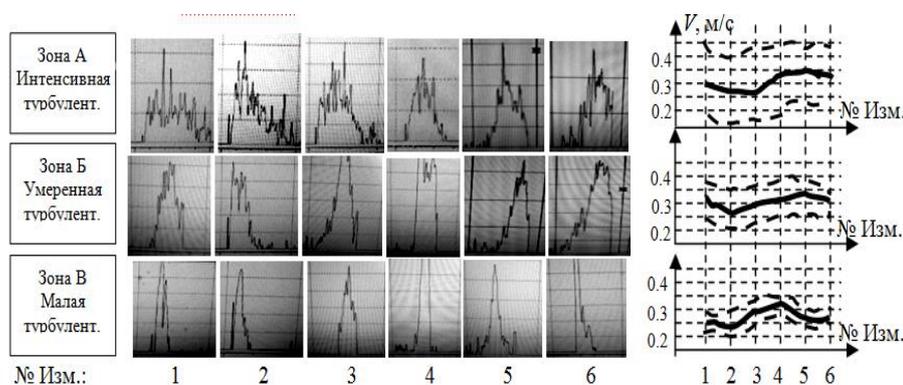


Рис. 9. Спектры сигналов для зон воздушного потока с различной турбулентностью:
V – проекция скорости воздушного потока на ось лидара

Выводы

Предложенные выражения позволяют провести моделирование зоны локации лидара при различном конструктивном исполнении и внешних условиях работы. Полученная форма спектра сигнала при разной степени турбулизации атмосферы позволяет измерять центральную частоту, пропорциональную средней скорости воздушного потока в области локации, и ширину спектра, пропорциональную турбулентности, с точностью не хуже 0,1 м/с. Полученные результаты в большинстве случаев удовлетворяют требованиям по точности измерения и подтверждают теоретически полученное формирование зоны локации.

Литература

1. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. / Пер. с англ. С.Н. Бреуса, А.И. Головашкина, А.А. Шубина. Под. ред. Г.П. Мотулевич. М.: Наука, 1970. 855 с.
2. Карасик В.Е., Орлов В.М. Локационные лазерные системы видения: Монография. М.: Изд-во МГТУ, 2013. 479 с.
3. Белов М.Л., Иванов С.Е., Городничев В.А., Стрелков Б.В. Лазерный дистанционный метод измерения порывов атмосферного ветра // Вестник МГТУ. Серия Приборостроение. 2014. №2. С.40 – 52.
4. Белов М.Л., Иванов С.Е., Городничев В.А., Михайловская М.Б. Моделирование двумерных полей атмосферных параметров в задачах лазерного дистанционного зондирования // Математическое моделирование и численные методы. 2015. №4(8) С.110 – 121.

5. Андреев М.В., Васильев Д.Н., Пенкин М.С., Смоленцев С.В., Борейшо А.С., Ключков Д.В., Коняев М.А., Орлов А.Е., Чугреев А.В. Когерентные доплеровские лидары для мониторинга ветровой обстановки // Фотоника. 2014. Т.48, №6. С.20–28.

6. Ванеев Г.Г., Мусьяков М.П., Мищенко И.Д. Проблемы ближней лазерной локации. М.: Издательство МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2000. 294 с.

7. Дворцов Д.В., Парфенов В.А. Спектральные характеристики одночастотного режима работы лазерных диодов // Научное приборостроение. 2014. Т.24, №3. С.42–48.

8. Вендеревская И.Г., Филачев В.Л., Танташев М.В. Оптическая модель атмосферы для задач расчета облученности входных зрачков оптико-электронных систем // Оптический журнал. 2014. Т.81. №4. С.3–10.

9. Kameyama S., Ando T., Asaka K., Hirano Y., Wadaka S. Compact all-fiber pulsed coherent Doppler lidar system for wind sensing // Applied Optics. 2007. V.46 N11. P. 1953- 1962.

10. Arnon Sh., Barry J., Karagiannidis G., Schober R. Advanced Optical Wireless Communication Systems. – Cambridge University Press, 2012.

11. Ayotte S., Faucher D., Babin A., Costin F., Latrasse C., Poulin M., Deschenes E.G., Pelletier F., Laliberte M. Silicon photonics – based laser system for high performance fiber sensing. – 24 th International Conference on Optical Fibre Sensors, SPEI Proceedings, 2015. V.9634.

Васильев Дмитрий Викторович – канд. технических наук, зам. главного конструктора АО «Раменский приборостроительный завод». E-mail: vasiliev1969@yandex.ru.

Ларюшин Александр Иванович – д-р техн. наук, профессор, научный консультант АО «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха.

References

1. Born M., Vol'f E.H. Osnovy optiki. Per. s angl. S.N. Breusa, A.I. Golovashkina, A.A. Shubina. Pod. red. G.P. Motulevich. M.: Nauka. 1970. - 855 s. [Born, M., Wolf, E. Principles of optics. Trans. from English. S.N. Breus, A.I. Golovashkin, A.A. Shubin. Under. Ed. G.P. Motulevich. M.: Nauka. 1970. - 855 p.]

2. Karasik V.E., Orlov V.M. Lokacionnye lazernye sistemy videniya. Monografiya Izd-vo MGTU, 2013. – 479 s. [Karasik V.E., Orlov V.M. Locating laser vision systems. Monograph Publishing House of MSTU, 2013. - 479 p.]

3. Belov M.L., Ivanov S.E., Gorodnichev V.A., Strelkov B.V. Lazernyj distancionnyj metod izmereniya poryvov atmosfernogo vetra // Vestnik MGTU. Seriya Priborostroenie. 2014. №2 – S.40 - 52. [Belov M.L., Ivanov S.E., Gorodnichev V.A., Strelkov B.V. Laser remote method for measuring gusts of atmospheric wind // Vestnik MSTU. Series Instrument making. 2014. №2 - P.40 - 52.]

4. Belov M.L., Ivanov S.E., Gorodnichev V.A., Mihajlovskaya M.B. Modelirovanie dvumernyh polej atmosferynh parametrov v zadachah lazernogo distancionnogo zondirovaniya // Matematicheskoe modelirovanie i chislennye metody. 2015. №4(8) – S.110 – 121. [Belov ML, Ivanov SE, Gorodnichev VA, Mikhailovskaya MB Modeling of two-dimensional fields of atmospheric parameters in laser remote sensing problems // Mathematical modeling and numerical methods. 2015. № 4 (8) - P.110 - 121.]

5. Andreev M.V., Vasil'ev D.N., Penkin M.S., Smolencev S.V., Borejsho A.S., Klochkov D.V., Konyaev M.A., Orlov A.E., Chugreev A.V. Kogerentnye doplerovskie lidary dlya monitoringa vetrovoj обстановки // Фотоника. 2014. т.48. №6. S.20-28. [Andreev M.V., Vasiliev D.N., Penkin M.S., Smolentsev S.V., Boreysho A. S., Klochkov D.V., Konyaev M.A., Orlov A.E., Chugreev A.V. Coherent Doppler lidars for monitoring wind conditions // Photonics. 2014. v. 48. №6. P.20-28.]

6. Vaneev G.G., Mus'yakov M.P., Mishchenko I.D. Problemy blizhnej lazernoj lokacii. M.: Izdatel'stvo MGTU imeni N.E.H. Baumana. 2000. - 294 s. [Benaiah G.G. Musyakov M.P. Mishchenko I.D. Problems near the laser ranging. M.: Publisher N.E. Bauman. 2000. - 294 p.]

7. Dvorcov D.V., Parfenov V.A. Spektral'nye harakteristiki odnochastotnogo rezhima raboty lazernyh diodov // Nauchnoe priborostroenie. 2014. t.24. №3. S.42-48. [Palaces D.V., Parfenov V.A. Spectral characteristics of single-frequency mode laser diodes // Scientific instrument. 2014 t.24. N3. P.42-48.]

8. Venderevskaya I.G., Filachev V.L., Tantashev M.V., Opticheskaya model' atmosfery dlya zadach rascheta obluchennosti vhodnyh zrachkov optiko – ehlektronnyh sistem // Opticheskij zhurnal. 2014. t.81. N4. S.3-10. [Venderevskaya I.G. Filachev V.L. Tantashev M.V., Optical atmosphere model to calculate the irradiance tasks of the entrance pupil of optical - electronic systems // Opt. 2014 t.81. №4. P.3-10.]

9. Kameyama S., Ando T., Asaka K., Hirano Y., Wadaka S. Compact all-fiber pulsed coherent Doppler lidar system for wind sensing // Applied Optics. 2007. V.46 N11. P.1953- 1962.

10. Arnon Sh., Barry J., Karagiannidis G., Schober R. Advanced Optical Wireless Communication Systems. – Cambridge University Press, 2012.

11. Ayotte S., Faucher D., Babin A., Costin F., Latrasse C., Poulin M., Deschenes E.G., Pelletier F., Laliberte M. Silicon photonics – based laser system for high performance fiber sensing. – 24 th International Conference on Optical Fibre Sensors, SPEI Proceedings, 2015. V.9634.

Vasil'ev Dmitrij Viktorovich - Cand. Sci. (Techn.), Deputy. Chief Designer of "Ramenskoye Instrument Plant

Laryushin Aleksandr Ivanovich - Doc. Sci. (Techn.), Prof., scientific consultant of "Research Institute" Polyus "them. M.F. Stelmakh.

Поступила в редакцию

25 февраля 2017г.