

УДК 537.877

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЧИВОСТИ ИНДЕКСА ПРЕЛОМЛЕНИЯ ТРОПОСФЕРЫ НА ДАЛЬНОСТЬ ПРЯМОЙ ВИДИМОСТИ И ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ КООРДИНАТ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ЦЕЛЕЙ

А.А. Мещеряков, С.Г. Госенченко, Л.И. Кижнер*

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

*Томский государственный университет

E-mail: rwplab@ms.tusur.ru

Приводятся результаты восстановления высотного профиля индекса преломления по данным аэрологического зондирования атмосферы над морем в летнее время за пять лет наблюдений и анализа изменчивости его характеристик применительно к вопросам оценки точности измерения координат радиолокационных целей. Используются данные зондирования, отсутствующие в публикациях.

Ключевые слова:

Индекс преломления, рефракция, дальность прямой видимости, погрешность радиолокационных измерений.

Key words:

Refractive index, refraction, distance of direct visibility, radar measurement errors.

В основе расчета погрешностей оценок координат радиолокационных целей лежит учет рефракционных свойств тропосферы в районе радиотрассы между радиолокационной станцией (РЛС) и целью.

В предлагаемом сообщении приводятся оценки параметров модели тропосферы с целью их использования для расчета дальности прямой видимости, а также погрешности определения дальности и угла места радиолокационных целей. Для этого были проведены обработка и анализ данных аэрологического зондирования тропосферы в юго-восточной части Охотского моря. Приводятся некоторые результаты обработки и численных расчетов.

Основным источником информации о состоянии тропосферы являются результаты ее зондирования системой аэрологических станций (АС) и кораблей погоды с измерением температуры, давления и влажности на разных высотах. По данным такого зондирования строится высотная зависимость индекса преломления.

На практике обычно используется экспоненциальная модель тропосферы, т. е. описание зависимости индекса преломления N от высоты h в виде

$$N(h) = N_0 e^{-bh},$$

или ее линейное приближение в нижнем слое атмосферы, применение которого оправдано до высот 2...3 км,

$$N(h) \approx N_0 + \Delta N h,$$

где N_0 – значение индекса преломления на уровне моря; ΔN – вертикальный градиент индекса преломления в нижнем километровом слое, постоянный в пределах этого слоя. С параметром b экспоненциальной модели он связан простым соотношением

$$\Delta N = -N_0 b.$$

Для обработки и анализа были использованы данные трех- или двухразового зондирования тропосферы над Охотским морем (на аэрологических станциях в г. Поронайск, г. Южно-Курильск, г. Вакканай и на о. Уруп) в летний период (июнь,

июль, август) 1971–1975 гг. Расстояние между станциями указано в табл. 1.

Таблица 1. Расстояние между станциями зондирования

Аэрологические станции зондирования	Расстояние, км
г. Ю.-Курильск – г. Поронайск	616
г. Ю.-Курильск – о. Уруп	438
г. Ю.-Курильск – г. Вакканай	320
г. Поронайск – о. Уруп	648
г. Поронайск – г. Вакканай	578
о. Уруп – г. Вакканай	665

Обработка и анализ заключались в следующем.

Для каждого зондирования вычислялся градиент ΔN в слое 1 км как отношение разности измеренных значений индекса преломления на высоте 1 км (или близкой к ней) и приземного N_s (на высоте пункта зондирования) к разности высот измерений.

Под измеренным значением индекса преломления здесь и далее понимается вычисленное его значение по данным зондирования по известной формуле Дебая [1].

Аналогично вычислялся градиент ΔN_{1-5} в слое 1...5 км как отношение разности измеренных значений индекса преломления на высоте 1 и 5 км (или близких к ним) к разности высот измерений.

По измеренным значениям строился высотный профиль индекса преломления.

Участок каждого профиля до высоты 5 км средствами MS Excel аппроксимировался экспонентой с записью значений параметров аппроксимации N_0 и b (в дальнейшем условно называемых модельными разовыми), а также точности аппроксимации.

Усреднением полученных на всех пунктах в разные сроки в указанные годы значений разовых модельных параметров получены средние параметры экспоненциальной модели тропосферы для исследуемого района $N_{0cp} = 330,7$ и $b_{cp} = 0,138$.

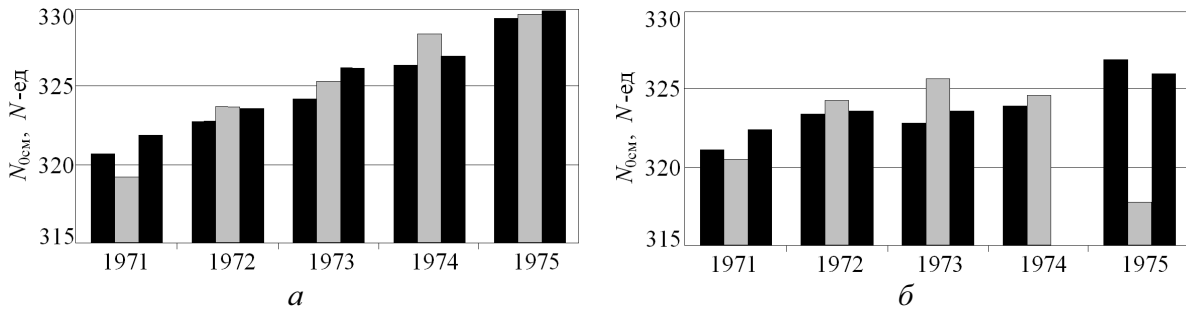


Рис. 1. Изменение среднемесячного (за июнь) значения параметра N_0 для АС: а) г. Поронайск; б) о. Уруп

Соответствующая усредненная модель высотного профиля индекса преломления приобретает вид

$$N_{\text{ср}}(h) = N_{0\text{ср}} e^{-h_{\text{ср}}/h} = 330,7 e^{-0,138h}$$

(высота измеряется в км).

На рис. 1 приведены среднемесячные значения модельного параметра N_0 ($N_{0\text{ср}}$) в разные сроки зондирования в июне разных лет для АС г. Поронайск и о. Уруп в виде триад, левый столбец в каждой из триад соответствует сроку зондирования 0 ч, средний и правый соответственно 12 и 18 ч по Гринвичу (GMT 0, 12 и 18). В 1971 и отчасти в 1972 г. зондирование проводилось в сроки GMT 3, 18 и 21 ч, результаты отнесены соответственно к срокам GMT 0, 12 и 18.

Среднемесячные значения параметра N_0 ($N_{0\text{ср}}$) для разных сроков зондирования в рассматриваемые месяцы отличаются в разных пунктах, но мало меняются в течение суток и от года к году. Что касается июня, то в рассматриваемый период (1971–1975) на АС в г. Поронайск отмечен рост $N_{0\text{ср}}$ от года к году. Этот эффект менее выражен в районе о. Уруп и в г. Южно-Курильске (в районе г. Вакканай из-за отсутствия данных за 1971–1973 гг. тренд не рассматривался). Возможно, эффект связан с климатическим изменением запаздывания начала летнего периода в районе о. Сахалин. Изменения такого характера требуют анализа многолетнего периода.

Пример изменения в течение месяца (в июле 1975 г.) разовых модельных значений N_0 , полученных «одновременно» (в один день и срок GMT 12) в отстоящих друг от друга на 665 км АС г. Вакканай и о. Уруп, приведен на рис. 2.

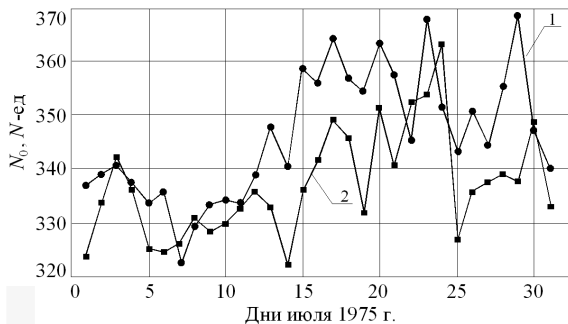


Рис. 2. Примеры изменчивости модельного параметра N_0 в течение июля 1975 г. на АС г. Вакканай (кривая 1) и на о. Уруп (кривая 2)

Коэффициент корреляции между разовыми модельными значениями N_0 , зафиксированными «одновременно» в разных парах пунктов зондирования в августе разных лет, представлен в табл. 2.

Характер изменчивости индекса преломления в слоях 0...1 и 1...5 км в летние месяцы разных лет можно оценить по данным табл. 3, где приведены среднемесячные значения измеренных градиентов в километровом слое (ΔN), в слое 1...5 км ($\Delta N_{(1-5)}$) модельного параметра N_0 , а также их стандартные отклонения для разных сроков зондирования в указанные месяцы на АС о. Уруп.

Таблица 2. Коэффициенты корреляции модельных значений N_0 в разных парах станций зондирования

Аэрологические станции зондирования	Годы			
	1971	1973	1974	1975
г. Поронайск – г. Ю.-Курильск	0,54	–	0,70	0,33
г. Поронайск – о. Уруп	0,22	0,43	0,44	0,43
г. Поронайск – г. Вакканай	–	0,75	0,84	0,72
о. Уруп – г. Вакканай	–	0,16	0,26	0,64
о. Уруп – г. Ю.-Курильск	0,28	–	0,67	0,37
г. Ю.-Курильск – г. Вакканай	–	–	0,49	0,50

Рефракция в атмосфере в рамках линейной модели атмосферы, которая оправдана до высот 2,5...3 км, часто учитывается введением эквивалентного радиуса Земли a_3 , отличающегося от реального множителем, называемым радиус-фактором k и зависящим от высотного градиента индекса преломления:

$$k = \frac{a_3}{a} = \frac{1}{1 + a \frac{dN}{dh} 10^{-6}},$$

где $a=6373$ км – радиус Земли.

В качестве градиента в этом случае обычно используется разность ΔN измеренных значений индекса преломления на высоте 1 км и его приземного значения.

В частности, радиус-фактор используется при определении дальности прямой видимости цели $R_{\text{пр}}$ [1] (в км, если высота антенны РЛС $h_{\text{РЛС}}$ и высота цели $H_{\text{ц}}$ даны в метрах):

$$R_{\text{пр}} = 3,57\sqrt{k}(\sqrt{h_{\text{РЛС}}} + \sqrt{H_{\text{ц}}}).$$

Пример изменчивости в течение месяца оценки дальности прямой видимости в зависимости от со-

стояния атмосферы демонстрирует рис. 3. На нем приведены расчеты по данным зондирования в срок GMT 12 на АС г. Вакканай в июле 1975 г. для высоты цели 1000 м и двух значений высоты антенны РЛС: 75 м (кривая 1) и 25 м (кривая 2). Стандартное отклонение от среднемесячного расчетного значения составило 8,4 км и 7,6 км соответственно. Горизонтальные прямые (3 на уровне 172,8 км и 4 на уровне 157,1 км) соответствуют расчету дальности с использованием модельного для всего района значения градиента индекса преломления в километровом слое ($-45,64 N$ -ед/км) для соответствующих высот антенны РЛС. Средне-

месячная оценка дальности для верхней кривой составляет 170,81 км, для нижней – 155,3 км, что отличается от «модельного» расчетного значения на 2 и 1,8 км соответственно.

Атмосферные ошибки радиолокационного определения дальности до цели связаны в основном с отличием групповой скорости в реальной среде и вакууме (неучет искривления луча приводит к ошибкам второго порядка малости [2]).

Расчет ошибки для модели слоисто-однородной атмосферы сводится к интегрированию по высоте высотного профиля индекса преломления с учетом угла места цели и ее высоты [2]:

Таблица 3. Характеристики высотного профиля индекса преломления по данным АС о. Уруп

Год	Июнь				Июль				Август			
	GMT	ΔN_{0-1}	ΔN_{1-5}	N_0	GMT	ΔN_{0-1}	ΔN_{1-5}	N_0	GMT	ΔN_{0-1}	ΔN_{1-5}	N_0
1971		Среднемесячные значения				Среднемесячные значения				Среднемесячные значения		
	3	-38,8	-28,3	321,1	3	-30,6	-31,5	336,2	3	-32,3	-32,4	336,9
	9	-39,7	-28,0	320,8	9	-27,9	-31,4	334,4	9	-35,1	-32,5	337,4
	21	-37,8	-28,8	322,3	21	-29,4	-31,2	335,5	21	-30,8	-32,2	338,7
		Стандартные отклонения				Стандартные отклонения				Стандартные отклонения		
	3	11,7	3,0	10,5	3	10,9	2,4	10,7	3	9,9	4,6	11,0
	9	7,5	2,8	10,1	9	18,8	3,6	11,0	9	8,7	6,0	11,8
21	11,6	3,1	11,3	21	13,4	3,1	11,8	21	10,0	3,1	11,3	
1972		Среднемесячные значения				Среднемесячные значения				Среднемесячные значения		
	3	-39,6	-28,3	323,5	3	-30,7	-31,2	336,3	3	-	-	-
	9	-38,4	-29,3	324,4	9	-35,1	-28,9	335,6	9	-	-	-
	21	-38,6	-28,6	323,8	21	-29,2	-31,2	336,3	21	-	-	-
		Стандартные отклонения				Стандартные отклонения				Стандартные отклонения		
	3	12,6	3,3	10,5	3	11,4	3,1	12,4	3	-	-	-
	9	9,7	2,6	9,9	9	14,0	3,8	13,3	9	-	-	-
21	13,4	3,6	11,0	21	15,9	2,9	10,6	21	-	-	-	
1973		Среднемесячные значения				Среднемесячные значения				Среднемесячные значения		
	0	-36,4	-28,2	323,0	0	-34,7	-30,3	336,3	0	-41,4	-30,0	339,6
	12	-34,8	-28,4	325,4	12	-31,3	-30,5	337,6	12	-35,4	-30,4	338,3
	18	-35,5	-28,1	323,8	18	-30,5	-30,3	336,6	18	-38,5	-29,6	335,9
		Стандартные отклонения				Стандартные отклонения				Стандартные отклонения		
	0	9,9	2,5	9,0	0	10,8	2,6	11,7	0	16,0	3,7	15,9
	12	10,3	2,7	9,5	12	11,6	2,4	10,7	12	8,9	3,0	13,0
18	9,0	2,5	7,8	18	15,1	2,7	11,3	18	13,3	3,9	11,2	
1974		Среднемесячные значения				Среднемесячные значения				Среднемесячные значения		
	0	-40,6	-28,1	324,2	0	-	-	-	0	-37,5	-30,4	336,4
	12	-37,4	-28,3	324,6	12	-	-	-	12	-33,4	-30,8	338,6
	18	-37,9	-28,4	302,8	18	-	-	-	18	-34,3	-30,6	337,4
		Стандартные отклонения				Стандартные отклонения				Стандартные отклонения		
	0	7,0	2,0	5,8	0	-	-	-	0	9,6	3,5	12,4
	12	8,1	2,9	7,0	12	-	-	-	12	14,3	2,8	12,7
18	6,5	1,7	6,6	18	-	-	-	18	13,4	3,2	13,6	
1975		Среднемесячные значения				Среднемесячные значения				Среднемесячные значения		
	0	-36,5	-28,8	326,8	0	-31,4	-30,8	337,1	0	-	-	-
	12	-34,4	-29,0	318,1	12	-28,6	-30,4	336,9	12	-	-	-
	18	-37,5	-28,5	326,0	18	-30,6	-30,3	336,4	18	-	-	-
		Стандартные отклонения				Стандартные отклонения				Стандартные отклонения		
	0	8,4	2,0	6,4	0	9,7	2,5	9,0	0	-	-	-
	12	10,9	2,2	7,6	12	10,6	2,5	10,2	12	-	-	-
18	9,1	1,9	6,0	18	9,3	2,5	8,9	18	-	-	-	

$$\Delta r = \frac{10^{-6}}{\sin(\theta_0)} \int_0^{h_c} N(h) dh,$$

где θ_0 – угол места цели.

Если предполагать экспоненциальный вид высотной зависимости индекса преломления, то после подстановки и интегрирования приходим к расчетной формуле

$$\Delta r = N_0 \frac{1 - e^{-bH_{ц}}}{b \sin(\theta_0)} \cdot 10^{-6}.$$

Для линейной модели высотной зависимости индекса преломления подстановка в выражение погрешности и интегрирование приводят к расчетной формуле в виде

$$\Delta r = \frac{(N_0 H_{ц} + \Delta N H_{ц}^2 / 2)}{\sin(\theta_0)} \cdot 10^{-6}.$$

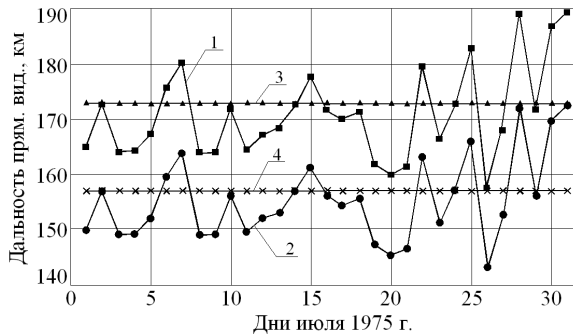


Рис. 3. Вариации оценки дальности прямой видимости по данным зондирования на АС г. Вакканай в течение июля 1975 г. для высоты цели 1000 м

На рис. 4 дано сравнение результатов расчета погрешности определения дальности до цели на высоте 2 км при угле места $0,5^\circ$ по экспоненциальной модели с разовыми параметрами, вычисленными для каждого сеанса зондирования (кривая 1), и по линейной модели, но с использованием измеренного в том же сеансе градиента (кривая 2). При дальности до цели около 200 км величина расчетной погрешности за счет тропосферы менялась от 62 до 76 см, а различие расчетов разными способами не превышало 3 см.

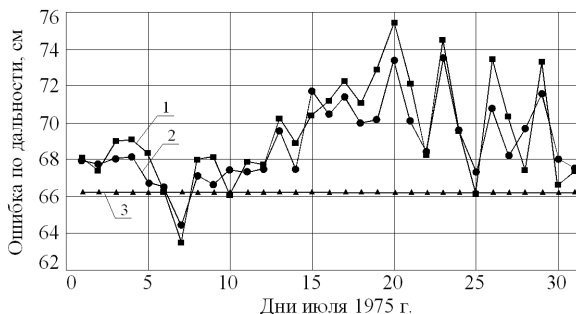


Рис. 4. Сравнение изменчивости расчетных ошибок оценки дальности с использованием параметров экспоненциальной модели и измеренного градиента индекса преломления по данным АС г. Вакканай в течение июля 1975 г.

При расчетах использованы данные зондирования на АС г. Вакканай в июле 1975 г. в срок зондирования 12. Расчет по модельным параметрам усредненной модели представлен на рисунке прямой 3.

Погрешность в определении угла места цели ε возникает за счет разницы истинного (геометрического) угла места цели θ_0 и направления приходящего к радиолокатору отраженного от нее луча, искривленного за счет рефракции, и вычисляется как разность этих направлений.

Формула расчета погрешности для линейной модели тропосферы имеет вид [3, 4]:

$$\varepsilon = \arctg \times \left[\frac{\cos \tau - \sin \tau \operatorname{tg} \theta - (1 + \Delta N H_{ц} / (N_0 + 10^6))}{(1 + \Delta N_0 H_{ц} / (N_0 + 10^6)) \operatorname{tg} \theta_0 - \sin \tau - \cos \tau \operatorname{tg} \theta} \right],$$

$$\theta = (\theta_0^2 + 2 \Delta N H_{ц} + 2 H_{ц} \cdot 10^6 / a)^{1/2},$$

$$\tau = \frac{-2 \Delta N H_{ц}}{\operatorname{tg} \theta_0 + \operatorname{tg} \theta}.$$

На рис. 5 представлен результат оценки погрешности определения угла места цели на высоте 0,5 и 2,5 км (кривые 1 и 2 соответственно) по среднемесячному значению «измеренного» в июле 1975 г. на АС г. Южно-Курильск градиента в километровом слое ($\Delta N_{см} = -35,11$ N-ед/км) и модельного значения $N_{0см} = 345,91$ N-ед/км) в зависимости от угла места цели. Кривая 3 на рисунке рассчитана по усредненной по району модели для высоты цели 2,5 км.

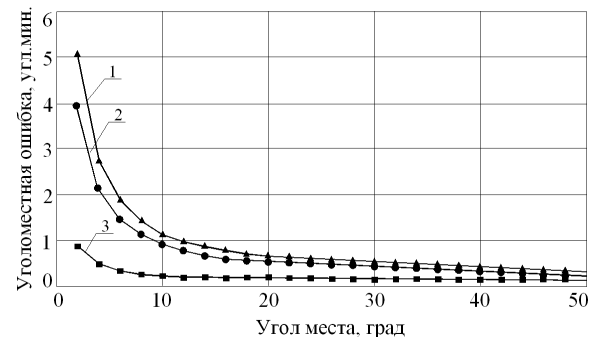


Рис. 5. Ошибка определения угла места цели (кривая 1 – для высоты 0,5 км; кривая 2 – для высоты 2,5 км; кривая 3 – для усредненной модели всего района для высоты цели 2,5 км)

Выводы

Данные стандартного аэрологического зондирования тропосферы позволяют проанализировать изменчивость параметров модели тропосферы, в частности, в пределах месяца или нескольких лет, что актуально для районов, слабо представленных соответствующими данными в доступной литературе, к которым относится юго-восточная часть Охотского моря.

Предлагаемое сообщение дает представление о характере изменчивости важных с точки зрения радиолокационных задач параметров тропосферы. В частности, требуют дополнительно анализа при-

чины отмеченного на аэрологической станции г. Поронайска роста в течение 5 лет среднемесячных (июньских) параметров экспоненциальной модели тропосферы.

Представленные результаты дают количественную оценку погрешности при использовании для расчета координат цели усредненных за большой период параметров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черный Ф.Б. Распространение радиоволн. – М.: Советское радио, 1962. – 480 с.
2. Радиоэлектронные системы. Справочник / под ред. Я.Д. Ширмана. – М.: ЗАО «МАКВИС», 1998. – 828 с.
3. Справочник по радиолокации / под ред. М. Скольника. Т. 1. – М.: Советское радио, 1976. – 456 с.
4. Бин Б.Р., Даттон Е.Дж. Радиометеорология. – Л.: Гидрометеоиздат, 1971. – 362 с.

Поступила 14.07.2010 г.

УДК 535.2:621.373.826

ФОРМИРОВАНИЕ БЕССЕЛЕВА ПУЧКА ПРИ КОНИЧЕСКОЙ ФОКУСИРОВКЕ В ТУРБУЛЕНТНОЙ АТМОСФЕРЕ

И.П. Лукин, Х.Т. Эйюбоглу*

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск

*Чанкайский университет, г. Анкара, Турция

E-mail: lukin_ip@iao.ru

Изучены особенности фокусировки гауссова оптического пучка с произвольной кривизной параболического волнового фронта конической линзой (аксиконом) в случайно-неоднородной среде. Анализ задачи основывается на решении уравнения для функции взаимной когерентности второго порядка поля оптического пучка. Рассчитано распределение средней интенсивности оптического пучка в продольном и поперечном сечениях к направлению распространения оптического излучения. Оценено влияние случайно-неоднородной среды на изменение радиуса центральной части оптического пучка в области фокального отрезка за аксиконом. Получен критерий устойчивости пространственной структуры сформированного таким образом псевдобесселева пучка к влиянию случайных неоднородностей среды.

Ключевые слова:

Бесселев пучок, оптическое излучение, коническая линза, аксикон, атмосферная турбулентность.

Key words:

Bessel beam, optical radiation, conical lens, axicon, atmospheric turbulence.

Введение

Описанный в 50-х гг. прошлого столетия оптический элемент, называемый аксиконом [1, 2], в последние годы находит всё более широкое применение в электронных оптических системах [3–8], в том числе и тех, которые работают в случайно-неоднородных средах, например, турбулентной атмосфере. Возможные применения аксикона (конуса из оптически прозрачного материала) основаны на том, что этот оптический элемент с осевой симметрией изображает точечный источник в виде множества точек, располагающихся вдоль оптической оси. Когда оптическая волна проходит через аксикон, она видоизменяется — её волновой фронт дополнительно искривляется, приобретая коническую составляющую.

При распространении в среде оптической волны с коническим волновым фронтом образуется узкий протяжённый максимум интенсивности оптического излучения вдоль оптической оси, в котором распределение интенсивности оптической волны оказыва-

ется пропорциональным квадрату функции Бесселя. В связи с этим полученную в результате этого преобразования оптическую волну называют бесселевым пучком [9, 10] (фактически речь идёт о формировании псевдобесселева пучка, т. к. бесселевым он является лишь в ограниченной пространственной области). Поскольку при распространении в случайно-неоднородной среде когерентность оптического излучения снижается, то ухудшаются и характеристики результирующей интерференционной картины, т. е. может происходить изменение структуры сформированного таким образом бесселева пучка.

В данной работе на основе решения уравнения для функции взаимной когерентности второго порядка анализируются возможности формирования бесселевых оптических пучков в случайно-неоднородной среде при помощи аксиконной фокусировки. Получено условие, при выполнении которого сформированный подобным образом в турбулентной атмосфере бесселев пучок сохраняет свои характерные топологические черты.