

УДК 621.37:520.37

А.И. Стрелков<sup>1</sup>, Е.И. Жилин<sup>1</sup>, А.П. Лытюга<sup>2</sup>, И.В. Любич<sup>3</sup><sup>1</sup> Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков<sup>2</sup> Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков<sup>3</sup> Донбасский государственный технический университет, Алчевск

## УЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ТУРБУЛЕНТНОСТИ АТМОСФЕРЫ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ЗОНДИРУЮЩИХ СИГНАЛОВ ЛАЗЕРНЫХ ЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

Рассмотрены вопросы влияния параметров пространственной и временной локализации турбулентных неоднородностей атмосферы на эффективность лазерной локации космических объектов на околоземных орбитах. Проведен качественный анализ параметров турбулентности атмосферы на искажение волнового фронта зондирующего лазерного излучения. Сделаны выводы о допустимых значениях времени стационарности характеристик турбулентной атмосферы и предложены способы их учета при формировании зондирующих сигналов лазерных локационных систем контроля (мониторинга) космического пространства.

**Ключевые слова:** турбулентная атмосфера, лазерная локация, космические объекты.

### Введение

Задачей лазерной локации космических объектов (КО), в том числе и искусственных спутников Земли (ИСЗ), является высокоточное измерение расстояний до удаленных объектов. Для этого используют сложные оптические системы, лазерный передатчик и фотоприемное устройство. Современные лазерные локационные системы (ЛЛС) обеспечивают измерение расстояния до спутников с потенциальной точностью в пределах единиц сантиметров.

В связи с активным освоением околоземного пространства и необходимостью контроля координатно-временного положения КО возрастает необходимость в повышении точности координатной

информации, получаемой с помощью ЛЛС, и улучшения их условных вероятностных характеристик обнаружения [1].

В этом случае возможно рассмотреть один из основных методов повышения точности измерений за счет увеличения статистически значимых реализаций значений оцениваемого параметра [2]. На практике, для увеличения размеров выборки современные локационные системы модернизируются по принципу увеличения частоты следования зондирующих импульсов вместе с сокращением импульсной энергии каждого посыла. В работе [3] рассмотрена зависимость числа откликов от различных групп ИСЗ в зависимости от частоты импульсов передатчика (рис. 1).

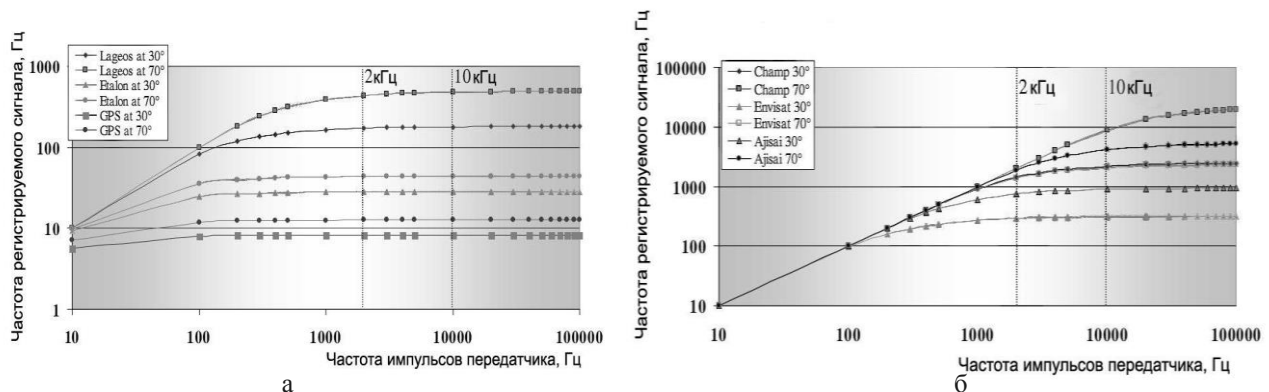


Рис. 1. Зависимость количества регистрируемых откликов от частоты следования зондирующих импульсов при локации низкоорбитальных (а) и среднеорбитальных (б) ИСЗ

Представленные данные были экспериментально получены на станции Graz (Австрия) при локации лазерным передатчиком с постоянной мощностью 5 Вт [3].

Анализ представленных данных дает возможность сделать вывод о том, что увеличение числа реализаций при локации низкоорбитальных КО происходит при повышении частоты передатчика до

10 кГц. Количество откликов при локации спутников группы GPS не превышает 100/с даже при значительном увеличении частоты передатчика с 1 кГц до 10 кГц. Следует отметить, что предельное значение частоты детектируемых сигналов в значительной степени зависит не только от высоты КО, а и угла его склонения.

В такой ситуации становится актуальной разработка требований к формированию локационных импульсов с учетом параметров тракта распространения излучения.

**Постановка задачи.** Проведение локационных измерений через атмосферу Земли предполагает учет ее влияния на распространяющееся лазерное излучение.

Энергетический расчет параметров передатчика современных ЛЛС учитывает ослабление лазерного пучка, проходящего через атмосферу. Практически реализованная эффективность локации иногда оказывается значительно меньше рассчитанной, т.к. не учитываются эффекты, возникающие в атмосферной турбулентности, которая искажает фронт световой волны и значительно снижает высокие потенциальные возможности оптической локационной системы.

**Целью данной работы** является разработка и проведение численного моделирования распространения лазерного излучения в турбулентной атмосфере. По результатам моделирования могут быть предложены рекомендации по выбору режима работы лазерного передатчика, обеспечивающего про-

хождение зондирующего излучения с наименьшими искажениями.

## Изложение основного материала

При распространении лазерного излучения в тропосфере значительный вклад в расширение пучка и отклонение его от прямолинейного распространения несут турбулентные пульсации. Турбулентное перемешивание атмосферных слоев различной температуры приводит к появлению флуктуаций показателя преломления в воздухе. Амплитуда флуктуаций температуры достигает десятых долей градуса, период флуктуаций меняется от миллисекунд до секунд [4]. Наибольшее расширение и отклонение луча происходит в дневное время, когда нагретые слои атмосферы подвергаются значительному турбулентному перемешиванию.

Случайные неоднородности показателя преломления приводят к наличию фазовых искажений в распространяющейся световой волне, а случайная интерференция вторичных волн – к наличию амплитудных искажений. Размеры областей скоррелированных значений фазы будут соответствовать размерам областей скоррелированных функций показателя преломления, поэтому без рассмотрения амплитудных искажений атмосферу представляют в виде тонкого фазового экрана [5].

Методика «фазового экрана» известна как способ введения флуктуации фазы во фронт распространяющейся волны (рис. 2).

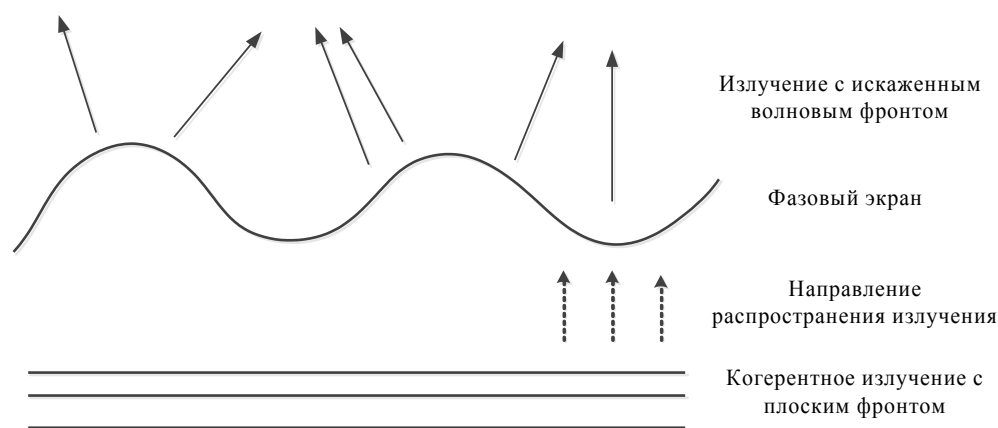


Рис. 2. Схема, иллюстрирующая метод фазового экрана

При пересечении лучом поверхности фазового экрана к его фазе добавляется величина, зависящая от точки падения луча.

Для целей лазерной локации КО можно рассматривать состояния фазового экрана как независимые в течение времени  $\tau_0$  «замороженности» атмосферы, при котором происходит перенос как целого всей совокупности неоднородностей без учета их эволюции в процессе движения.

Постоянная времени атмосферы  $\tau_0$  определяется исходя из пространственных свойств фазового экрана

$$\tau_0 = 0,31 \frac{\rho_0}{v}, \quad (1)$$

где  $v$  – скорость ветра, усредненная по высоте;  $\rho_0$  – радиус корреляции атмосферных искажений (параметр Фрида).

При прохождении оптического импульса с длительностью, значительно меньшей  $\tau_0$ , параметры атмосферы остаются практически неизменными. Усреднения функции амплитудных и фазовых искажений не происходит, а распространяющийся сигнал описывается мгновенным распределением интенсивности. Следующие посылки зондирующих импульсов будут попадать на независимые состояния фазового экрана.

Искажения фазы волнового фронта, вносимые атмосферой, носят случайный характер и не зависят от волнового фронта проходящего излучения. Предполагая, что атмосфера является изотропной, фазовый экран представляет собой нормальный случайный процесс и может быть описан непрерывной функцией  $\varphi(x, y)$ , где  $x, y$  – пространственные координаты в плоскости апертуры.

Поле плоской волны до фазового экрана описывается функцией  $u(x, y)$ . Результат взаимодействия когерентного излучения с турбулентной атмосферой можно представить в виде:

$$E = u(x, y) \exp(i \varphi(x, y)),$$

где действительные случайные функции  $u(x, y)$  и  $\varphi(x, y)$  соответствуют случайной реализации амплитудных и фазовых искажений в момент наблюдения.

Флуктуации коэффициента преломления атмосферы подчиняются закону Колмогорова:

$$D_{C_n}(\Delta \vec{r}) = C_n^2 \Delta \vec{r}^{-2/3}. \quad (2)$$

Если пренебречь амплитудной модуляцией световой волны, ограничившись учетом фазовых искажений, то фазовая структурная функция плоской волны, прошедшей атмосферу имеет вид:

$$D_\varphi(\Delta \vec{r}) = 6,88 \left( \frac{\Delta \vec{r}}{\rho_0} \right)^{5/3}. \quad (3)$$

Величина  $\rho_0$  изменяется в течение суток 30 – 50 см ночью и 3 – см днем. Для трассы с зенитным расстоянием  $\Theta$  [3]:

$$\rho_0 = \left( \frac{0,06 \lambda^2}{B} \right)^{3/5}, \quad (4)$$

где  $B = 3 \sec \theta C_n^2 (1 - 3 \sqrt{\frac{h}{H}}) h$ ;  $\lambda$  – длина волны электромагнитного излучения;  $C_n$  – структурная функция показателя преломления;  $h$  – высота точки стояния оптического средства;  $H$  – высота объекта.

Параметр Фрида  $\rho_0$  используется как количественная характеристика пространственного масштаба турбулентности, зависящая от длины волны и длины пути распространения света.

Для реализации математической модели фазо-

вого экрана с необходимыми статистическими свойствами используется последовательность случайных чисел распределения Гаусса с последующей фильтрацией спектром Колмогорова.

Пример реализации модели фазового экрана для указанного случая показан на рис. 3.

Фазовые флуктуации поля плоской волны, прошедшей фазовый экран, обуславливают случайный наклон волнового фронта, который приводит к отклонению луча от прямолинейного направления распространения. Искривление волнового фронта происходит с частотой, зависящей от состояния турбулентной атмосферы.

Информация о временном масштабе фазового экрана содержится в спектральной функции. Проанализируем спектр колебаний атмосферы при различных пространственных масштабах турбулентности. Согласно теореме Винера-Хинчина, спектральная плотность является преобразованием Фурье автокорреляционной функции фазы плоской волны.

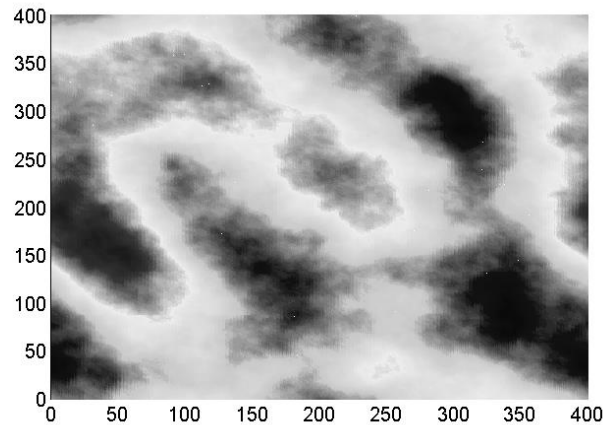


Рис. 3. Реализация распределения фазы в турбулентной атмосфере для случая  $\rho_0 = 19,7$  см,  $C_n^2 = 8e-16$  м<sup>-2</sup>/3,  $\lambda = 0,532$  мкм.  $H = 4$  км

$$S = F[R_\varphi]. \quad (5)$$

Функция автокорреляции поля плоской волны в апертурной плоскости описывается с помощью фазовой структурной функции:

$$R_\varphi(\Delta \vec{r}) = \exp\left(-\frac{1}{2} D_\varphi(\Delta \vec{r})\right). \quad (6)$$

Подставляя в спектральную функцию (5) различные значения радиуса корреляции атмосферных искажений, получим соответствующие значения спектральной плотности атмосферных флуктуаций.

$$S = F \left[ \exp \left( -3,44 \left( \frac{\Delta \vec{r}}{\rho_0} \right)^{5/3} \right) \right]. \quad (7)$$

На рис. 4 показана зависимость частоты флуктуаций неоднородностей атмосферы от радиуса корреляции атмосферных искажений.

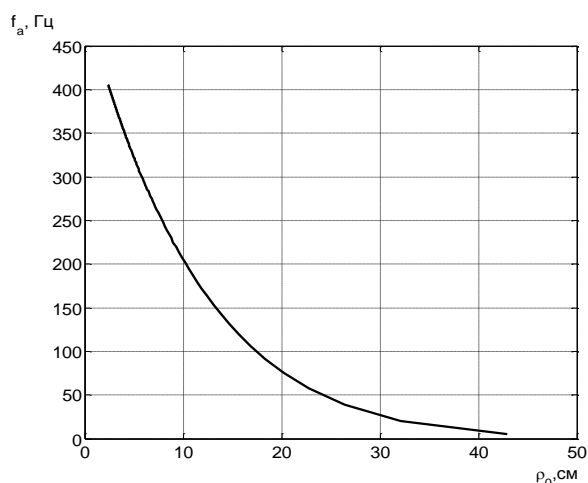


Рис. 4. Зависимость частоты флуктуации атмосферы от радиуса корреляции атмосферных искажений

С увеличением радиуса корреляции атмосферных искажений возрастает спектральная плотность флуктуации наклона волнового фронта.

Частота флуктуации атмосферы будет больше в случае уменьшения корреляционного радиуса турбулентных неоднородностей атмосферы. Полученная зависимость численно не учитывает возможность перемещения зондирующего луча по траектории лоцируемого объекта.

## Выводы

Из приведенных результатов исследований можно сделать следующие выводы:

- обеспечение эффективного использования лазерно-локационной системы возможно с учетом флуктуации фазы лазерного излучения в турбулентной атмосфере;
- статистически коррелированные смещения фазы позволяют анализировать состояние атмосферы для выбора параметров локационных импульсов,

## ВРАХУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ТУРБУЛЕНТНОСТІ АТМОСФЕРИ ПРИ ФОРМУВАННІ ЗОНДУЮЧИХ СИГНАЛІВ ЛАЗЕРНИХ ЛОКАЦІЙНИХ СИСТЕМ КОНТРОЛЮ КОСМІЧНОГО ПРОСТОРУ

О.І. Стрелков, Є.І. Жилін, О.П. Литюга, І.В. Любич

*Розглянуті питання впливу параметрів просторової і тимчасової локалізації турбулентних неоднородностей атмосфери на ефективність лазерної локації космічних об'єктів на ококлоземних орбітах. Проведений якісний аналіз параметрів турбулентності атмосфери на спотворення хвильового фронту зондуючого лазерного випромінювання. Зроблені висновки про допустимі значення часу стаціонарності характеристик турбулентної атмосфери і запропоновані способи їх обліку при формуванні зондуючих сигналів лазерних локаційних систем контролю (моніторингу) космічного простору.*

**Ключові слова:** турбулентна атмосфера, лазерна локація, космічні об'єкти.

## WITHIN THE PARAMETERS OF THE ATMOSPHERIC TURBULENCE IN THE FORMATION OF THE PROBING SIGNALS OF LASER RADAR SYSTEMS, SPACE CONTROL

A.I. Strelkov, E.I. Zhilin, A.P. Lityuga, I.V. Liubich

*The paper deals with the influence of the parameters of the spatial and temporal localization of turbulent atmospheric irregularities on the effectiveness of laser ranging space objects. The high-quality analysis of parameters of turbulence of atmosphere is conducted on distortion of wave front of sounding laser radiation. Conclusions are done about the legitimate values of time of stationarity of distortions of turbulent atmosphere and the methods of their account are offered at forming of soundings signals of the laser локационных checking (monitoring) of space systems.*

**Keywords:** turbulent atmosphere, laser location, space objects.

которые будут иметь наименьшие фазовые флуктуации;

– момент запуска лазерного передатчика необходимо рассинхронизировать со значением среднего периода флуктуаций параметров атмосферы;

– данное обстоятельство важно при локации низкоорбитальных КО, в связи с наблюдаемым, в этом случае, соответствием величин времени «замороженности» атмосферы и временем задержки лазерного локационного сигнала.

## Список литературы

1. J. McGarry. An Overview of satellite Laser Ranging / J. McGarry. – Nasa/GSFC/694 June, 2012.
2. Juping C. Progress in KHz SLR and laser ranging to un-cooperative space targets at Shanghai Station / C. Juping, Zh. Zhongping, W. Zhibo, Zh. Haifeng, Li Pu, Y. Fumin // May 16 - 20, 2011. – 17th International Workshop on Laser Ranging.
3. Kirchner G. Pushing Graz SLR from 2 kHz to 10 kHz repetition rate / G. Kirchner, F. Koidl, F. Iqbal // Institute for Space Research Austrian Academy of Sciences, Bad Kötzing (Germany), May 16 - 20, 2011. – 17th International Workshop on Laser Ranging.
4. Зуев В.Е. Перенос оптических сигналов в земной атмосфере (в условиях помех) / В.Е. Зуев, М.В. Кабанов // М.: Сов.радио, 1977. – 368 с.
5. Оптическая локация. Теоретические основы приема и обработки оптических сигналов: Монография / А.И. Стрелков, Т.А. Стрелкова, А.П. Литюга, С.В. Москвитин; Под ред. Заслуженного изобретателя Украины, доктора технических наук, профессора А.И. Стрелкова. – Х.: Вировец А.П. «Апостроф», 2010. – 312 с.

Поступила в редколлегию 4.12.2012

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Л.Ф. Купченко, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.