

УДК 621.37:520.37

А.И. Стрелков¹, Е.И. Жилин¹, И.В. Любич²¹ Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков² Донбасский государственный технический университет, Алчевск

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ СИГНАЛОВ ЛАЗЕРНЫХ ЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА В УСЛОВИЯХ ТУРБУЛЕНТНОЙ АТМОСФЕРЫ

В статье проведен анализ применимости модели турбулентной атмосферы для задач лазерной локации космических объектов. На основании данного анализа обоснованы требования к параметрам зондирующих сигналов лазерных локационных систем контроля космического пространства. С учетом основных положений корпускулярной теории света проведено математическое моделирование процесса обнаружения лазерных локационных сигналов, отраженных от космических объектов. Получены аналитические выражения и рассчитаны зависимости условных вероятностей правильного обнаружения и ложной тревоги от различных условий наблюдения космических объектов.

Ключевые слова: лазерная локация, космические объекты, обнаружение сигналов, турбулентная атмосфера.

Введение

Использование космических аппаратов на околоземных орбитах позволяет создавать навигационные, метеорологические и геодинамические системы, организовывать системы связи. Интенсивное использование космического пространства на современном этапе приобрело глобальный характер и повлекло за собой трудности в обеспечении безопасности космической деятельности.

С момента запуска первого искусственного спутника Земли возникла необходимость в контроле околоземного космического пространства. За прошедшее время было совершено более 6300 запусков космических объектов (КО), из них около 5400 объектов уже не функционируют и относятся к категории космического мусора.

При столкновениях объектов на орбите образуется большое количество осколков, каждый из которых может представлять серьезную угрозу для действующих спутников и последующих запусков. По оценкам специалистов, на сегодняшний день насчитывается более 20 тыс. объектов космического мусора с размерами от 10 см [1]. При этом, на орбитах до 600 км существует возможность сокращения количества мусора за счет поглощения его атмосферой. Объекты геостационарной орбиты не могут быть утилизированы, а только выведены в зону захоронения на 300 км выше рабочей орбиты, где могут просуществовать неограниченное время.

Пока проблема утилизации космического мусора открыта, единственным возможным способом избежать столкновений является соблюдение принципов международного соглашения по использованию космического пространства и осуществление

контроля космического пространства с предоставлением точной информации о КО и их местоположении. Накопление данных об объектах космического мусора осуществляется путем ведения каталога КО в рамках задач системы контроля космического пространства (СККП).

СККП объединяет в себе радиолокационные, оптико-электронные и лазерно-локационные средства наблюдения. Использование данных средств позволяет своевременно получать координатную и некоординатную информацию о КО для обеспечения безопасности космических полетов.

Лазерные-локационные системы (ЛЛС) обеспечивают высокоточное измерение расстояния до КО используя предварительные целеуказания от радиолокационной системы. Обнаружение основано на тех же принципах что и в радиолокации, но за счет использования когерентного оптического излучения достигается значительно большая точность определения координат КО и более высокая разрешающая способность оптической системы.

ЛЛС представляет собой довольно сложный измерительный комплекс, к которому предъявляются высокие требования по точности определения координат КО. По данным Международной службы ЛЛС, объединяющей более 40 станций, современная точность измерений достигнута в субсантиметровом диапазоне [2]. В Украине функционирует сеть оптических станций, которые обеспечивают исследования околоземного космического пространства, и сопровождение ИСЗ, в том числе и отечественного зондирующего аппарата Сич-2. Среди них пять работают в режиме лазерно-локационных наблюдений [3].

Особенностью лазерной локации является зависимость эффективности ее работы от состояния

канала распространения излучения. Турбулентная атмосфера, как искажающая среда, в значительной степени снижает потенциальные возможности ЛЛС.

Актуальной является задача исследования эффективности ЛЛС в зависимости от внешних условий наблюдений и поиск способов, позволяющих повысить эффективность ЛЛС в СККП.

Анализ вопроса. Практическая эффективность лазерной локации иногда является значительно меньшей, чем расчетная [4], т.к. в большинстве случаев в расчетах не принимаются во внимание эффекты, связанные с атмосферной турбулентностью, которые приводят к заметным амплитудным и пространственным искажениям зондирующих сигналов [5].

Как правило, при выборе параметров зондирующего импульса используется локационное уравнение, которое учитывает энергетическое ослабление лазерного излучения за счет поглощения и рассеивания в атмосфере, а расходимость считается на уровне дифракционного предела. Согласно теории распространения волн в турбулентной атмосфере, энергетические потери проходящего излучения оказываются незначительными даже по сравнению с потерями из-за молекулярного рассеяния, в то время как параметры волны испытывают существенные флуктуации [6].

Флуктуации фазы волны приводят к расширению оптического пучка, отклонению от прямолинейного распространения и расщеплению. Если в ходе локационных наблюдений зондирующее оптическое излучение претерпевает значительные фазовые флуктуации, то необходимый уровень интенсивности излучения на входе приемной системы ЛЛС часто не может быть достигнут [7].

Для устранения фазовых искажений используются адаптивные оптические системы, корректирующие фронт лазерного луча на величину фазовых искажений турбулентной атмосферы. Такие системы значительно усложняют и удорожают лазерный измерительный комплекс.

Кроме того, быстродействие адаптивной системы ограничено скоростью перестройки деформируемого зеркала [8].

На сегодняшний день нет данных о локационных системах, за исключением адаптивных, в которых бы учитывалось состояние турбулентной атмосферы при передаче лазерного излучения.

В связи с этим, представляет интерес задача наиболее рационального использования имеющихся энергетических возможностей ЛЛС при работе в условиях турбулентной атмосферы.

Целью данной статьи является анализ условий применения модели турбулентной атмосферы при проектировании и эксплуатации ЛЛС, а также количественная оценка эффективности процесса обнаружения с использованием предложенного метода.

Математическое моделирование

Измерение расстояния до КО происходит с помощью измерения временного промежутка между моментом излучения локационного сигнала и моментом регистрации отраженного. Эхо-сигнал регистрируется способом прямого фотодетектирования, который позволяет фиксировать его временные и энергетические характеристики.

Эффективность работы ЛЛС системы при решении задачи обнаружения будет определяться вероятностными характеристиками обнаружения. В этом случае для обеспечения необходимого уровня эффективности обнаружения, энергетический расчет ЛЛС может быть сведен к определению требуемой энергии излучения при заданных исходных параметрах оптической системы, характеристик объекта локации и условий распространения излучения.

Влияние атмосферной турбулентности на зондирующее лазерное излучение различно в направлениях Земля–космос и космос–Земля. Построение наземных ЛЛС обуславливается нахождением турбулентного атмосферного слоя в непосредственной близости к апертуре передатчика и приемника. Тогда атмосферный канал можно представить в виде амплитудно-фазового экрана, который вносит искажения в волновой фронт лазерного пучка и ограничивает минимально достижимую ширину коллимированного пучка в дальней зоне [9]. Зондирующий луч расширяется и отклоняется от прямолинейного распространения. В отдельных случаях состояние турбулентной атмосферы может привести к такому искажению волнового фронта зондирующего луча, при котором на поверхности объекта распределение интенсивности оказывается недостаточным для достижения требуемой эффективности обнаружения отраженного от КО излучения [10].

Также, на трассе распространения космос–Земля при приеме излучения наблюдаются значительные флуктуации угла прихода излучения вследствие скоростной аберрации, которая приводит к смещению дифракционной картины в плоскости апертуры приемной системы. При этом энергия отраженного сигнала будет существенно зависеть от отражательных характеристик объекта локации.

Таким образом, значительное уменьшение плотности излучения в плоскости объекта обусловлено прохождением лазерного пучка через турбулентную атмосферу. Для анализа влияния флуктуаций интенсивности излучения в плоскости объекта на эффективность обнаружения оптического сигнала используем математическую модель, которая позволяет прогнозировать искажения пространственных характеристик лазерных пучков вносимые турбулентной средой. Это, в свою очередь, даст возможность осуществлять выбор оптимальных параметров передатчика на основе анализа характеристик обнаружения ЛЛС.

Запишем распределение электрического поля на выходе передающей оптической системы, полагая, что генерируемое передатчиком излучение обладает идеальной монохроматичностью [5]:

$$E(\vec{r}, t) = \text{Re} \left[E_0(\vec{r}) e^{-j(\omega t - \vec{k}\vec{r})} \right], \quad (1)$$

где k – волновое число; $E_0(\vec{r})$ – амплитуда волны; ω – частота электромагнитных колебаний.

Так как исследуется монохроматическое поле, то распределение (1) электрического поля плоской волны не зависит от времени.

Для практических целей лазерной локации проводим анализ распределения поля в дальней зоне Фраунгофера, расположенной на расстоянии

$$R \gg \frac{L^2}{\lambda}, \quad (2)$$

где L – размер поверхности излучателя; λ – длина волны зондирующего излучения.

Пространственное распределение поля в плоскости дифракции Фраунгофера определяется распределением поля в плоскости излучателя [9]:

$$E(u, v) = -\frac{e^{jkR}}{j\lambda R} e^{-j\frac{k}{2R}(u^2+v^2)} \cdot \int_{\Omega_0} \int E(x, y) e^{-j\frac{k}{R}(xu+yv)} dx dy, \quad (3)$$

где x, y – координаты апертурной плоскости передатчика, в которой расположена область Ω_0 источника лазерного излучения; u, v – координаты плоскости объекта локации.

Используя выражения для угловых координат вида: $\sin \theta_u = \frac{u}{R}$, $\sin \theta_v = \frac{v}{R}$ и полагая θ малым, запишем распределение (3) в виде:

$$E(\theta_u, \theta_v) = \int_{\Omega_0} \int E(x, y) e^{-jk(\theta_u x + \theta_v y)} dx dy. \quad (4)$$

Полученное соотношение показывает, что угловое распределение поля с учетом дифракции в дальней зоне не зависит от расстояния. Результат интерференции волн, приходящих с поверхности Ω_0 , зависит от первоначального распределения поля $E(x, y)$.

В распределении подразумевается, что световая волна имеет одинаковую фазу во всех точках плоскости объекта. На практике искажения фазового фронта могут быть внесены самой локационной оптической системой и атмосферой, в которой распространяется зондирующее излучение.

Для описания процесса взаимодействия лазерного излучения с турбулентной атмосферой используются количественные пространственно-временные показатели турбулентности. Радиус корреляции атмосферных неоднородностей ρ_0 представляет собой линейный размер области атмосферы, в рамках кото-

рого флуктуации фазы световой волны не превышают 1 рад. Временным масштабом стационарности турбулентной атмосферы является время «замороженности», которое в зависимости от степени турбулентности может составлять до 10 мс. Угловой изопланатизма θ_0 ограничивает скоррелированную область ρ_0 на средней высоте турбулентности и имеет порядок от 10^{-6} до 10^{-4} рад [5]. Наибольшие значения θ_0 соответствуют наибольшим значениям радиуса корреляции и более низкой частоте смены реализаций фазового экрана, что характеризует атмосферу с наименьшей степенью турбулентности.

Для создания достаточной интенсивности излучения на объекте необходимо учитывать расходимость излучения передатчика, которая при прохождении через турбулентную атмосферу будет ограничиваться радиусом корреляции атмосферных неоднородностей.

С учетом ограничений, которые накладывает турбулентная атмосфера, распределение поля на объекте локации может быть охарактеризовано дифракционной картиной на круглом отверстии радиуса $a = c_0$. Тогда выражение (4) можно представить в виде:

$$E_P = E_0 \int_0^a \int_0^{2\pi} e^{-jk\rho \sin \theta \cos(\varphi - \psi)} \rho d\rho d\varphi, \quad (5)$$

где ρ и φ – полярные координаты в плоскости передатчика;

$$x = \rho \cos \varphi, \quad y = \rho \sin \varphi;$$

$$k_x = k \sin \theta \cos \Psi, \quad k_y = k \sin \theta \sin \Psi.$$

Направление распространения волны характеризуется углом θ к оси z и азимутальным углом Ψ .

Используя интегральное представление функций Бесселя нулевого и первого порядка, запишем для (5):

$$E_P = 2\pi E_0 \int_0^a J_0(k\rho\theta) \rho d\rho = E_0 \pi a^2 \frac{2J_1(ka\theta)}{ka\theta}. \quad (6)$$

Угловое распределение интенсивности в плоскости дифракции описывается выражением [10]:

$$I(\theta) = |E(\theta)|^2 = I_0 \left[\frac{2J_1(k\rho_0\theta)}{k\rho_0\theta} \right]^2. \quad (7)$$

Параметр c_0 может изменяться в пределах от единиц до десятков сантиметров, что существенным образом сказывается на распределении $I(\theta)$. К тому же малая величина c_0 приводит к мультипликативным искажениям волнового фронта, что проявляется в пространственной неоднородности освещенности объекта лазерным излучением.

С увеличением степени турбулентности атмосферы и уменьшением радиуса корреляции c_0 будет на-

блюдаться уменьшение интенсивности оптического сигнала на поверхности приемной оптической системы.

Количество отраженного излучения и его направленность определяются формой объекта локации, его размерами и типом отражающей поверхности, а также условиями облучения. Объекты, снабженные световозвращателями, создают поток вторичного излучения большей мощности, поскольку возвращают излучение высокой направленности в отличие от объектов с диффузно рассеивающими поверхностями.

В плоскости приемника интенсивность излучения, отраженного диффузно рассеивающей поверхностью площадью S с коэффициентом отражения ρ определяется выражением [9]:

$$I_{\text{пр}} = \frac{I_{\text{ц}} \rho S}{\pi R^2} \cos^2 \varphi. \quad (8)$$

Для объекта снабженного светоотражателем:

$$I_{\text{пр}} = \frac{I_{\text{ц}} \sigma}{\theta_{\text{отр}} R^2}, \quad (9)$$

где σ – эквивалентная площадь рассеяния световозвращателя объекта локации; $\theta_{\text{отр}}$ – угол расходимости световозвращателя.

Для случая некогерентного фотодетектирования пространственная когерентность оптического поля не сохраняется, а фотодетектор регистрирует только энергию принимаемого поля.

Численные оценки

Проведем оценку интенсивности регистрируемого сигнала на основе распределения сигнала в апертурной плоскости приемной оптической системы. Для этого воспользуемся переходом к квантово-механическому описанию процесса фотодетектирования.

Интенсивность потока фотоэлектронов на выходе фотодетектора пропорциональна интенсивности светового потока $I(t)$, падающего на фотодетектор с эффективностью η фотоэлектронного умножителя.

Среднее число фотоэлектронов, вылетающих на интервале τ , будет [9]:

$$\bar{n} = \frac{\eta}{h\nu} \int_0^{\tau} I(t) dt, \quad (10)$$

где $h\nu$ – энергия фотона на частоте излучения лазерного передатчика.

В рассматриваемом случае постоянной интенсивности светового сигнала, в силу квантовой природы регистрируемого сигнала, моменты появления фотоэлектронов и их количество будут случайными и описываются распределением Пуассона [11]:

$$P = \frac{\bar{n}^n}{n!} e^{-\bar{n}}, \quad (11)$$

где \bar{n} – среднее число фотоэлектронов за время регистрации.

Расчет характеристик обнаружения производим согласно критерию Неймана-Пирсона. Вероятность ложной тревоги F и правильного обнаружения D определяются выражениями [9]:

$$F = \sum_{n=n_0}^{\infty} \frac{\bar{n}_{\text{п}}^{-n}}{n!} e^{-\bar{n}_{\text{п}}}, \quad (12)$$

$$D = \sum_{n=n_0}^{\infty} \frac{(\bar{n}_{\text{с}} + \bar{n}_{\text{п}})^n}{n!} e^{-(\bar{n}_{\text{с}} + \bar{n}_{\text{п}})}, \quad (13)$$

где n_0 – пороговое значение числа фотоэлектронов; $\bar{n}_{\text{п}}$ – среднее число помеховых фотоэлектронов за реализацию при отсутствии сигнала; $\bar{n}_{\text{с}}$ – среднее число сигнальных фотоэлектронов.

Для расчета характеристик обнаружения необходимо знать распределение помехи $\bar{n}_{\text{п}}$ и аддитивной смеси сигнала и помехи $\bar{n}_{\text{с}} + \bar{n}_{\text{п}}$ на выходе приемника.

Основными источниками помех ЛЛС являются собственные шумы фотоприемника и внешняя фоновая засветка. Собственные шумы фотоприемника определяются темновым током $i_{\text{т}}$ прибора с коэффициентом усиления M за время регистрации τ . Число фоновых фотоэлектронов $\bar{n}_{\text{ф}}$ определяется коэффициентом квантовой эффективности η фотокатода и спектральной мощностью излучения неба $P_{\text{ф}}$. Таким образом, запишем для помеховой составляющей принимаемой аддитивной смеси [7]:

$$\bar{n}_{\text{п}} = \bar{n}_{\text{т}} + \bar{n}_{\text{ф}} = i_{\text{т}} \frac{\tau}{eM} + \frac{P_{\text{ф}}}{h\nu} \eta \tau. \quad (14)$$

Мощность рассеянного однородного свечения неба, попадающего на вход оптической системы с узкополосным фильтром $\Delta\lambda$ будет зависеть от площади апертуры приемной оптической системы $S_{\text{пр}}$, поля зрения $\Omega_{\text{пр}}$ и спектральной яркости неба L_{λ} :

$$P_{\text{ф}} = L_{\lambda} \Delta\lambda S_{\text{пр}} \Omega_{\text{пр}} k_{\text{пр}}, \quad (15)$$

где $\Delta\lambda$ – полоса пропускания оптического фильтра фотоприемника; $k_{\text{пр}}$ – коэффициент пропускания приемного оптического тракта.

Среднее значение помеховой составляющей сигнала при засветке ночного неба составляет 2 ф.э. Принимая величину условной вероятности ложной тревоги на уровне $F = 10^{-5}$ и используя выражение (10) определим значение n_0 , которое для заданных условий будет численно равно $n_0 = 15$ ф.э.

Среднее количество сигнальных фотоэлектронов будет зависеть от параметров тракта распространения зондирующего излучения и отражательных характеристик объекта локации

$$\bar{n}_{\text{с}} = \frac{W_{\text{пер}} k_{\text{пер}} k_{\text{атм}}^2 \sigma S_{\text{пр}} k_{\text{пр}} \eta}{R^4 \theta_{\text{пер}} \theta_{\text{отр}} h\nu}, \quad (16)$$

где $W_{\text{пер}}$ – энергия зондирующего импульса; $k_{\text{пер}}$ – коэффициент пропускания передающей оптической системы; $k_{\text{атм}}$ – коэффициент пропускания атмосферы.

Дальнейшую числовую оценку проведем для локации спутника типа Lageos, снабженного угловыми отражателями, высота орбиты которого $R = 5800$ км, а эффективная площадь рассеяния $\sigma = 7 \cdot 10^6 \text{ м}^2$. Параметр расходимости лазерного излучения передающей системы $\theta_{\text{пер}}$ учитывает турбулентное уширение зондирующего пучка.

Для различной степени турбулентности атмосферы определим среднее количество сигнальных фотоэлектронов и найдем зависимость условной вероятности правильного обнаружения D от величины энергии передатчика $W_{\text{пер}}$.

Пространственный радиус корреляции атмосферных искажений определяет расстояние, на котором флуктуации оптической разности хода световой волны меньше ее длины. При этом расходимость излучения на выходе оптической системы не может быть меньше дифракционной расходимости для апертуры с радиусом ρ_0 .

На рис. 1 показана зависимость условной вероятности правильного обнаружения от радиуса корреляции атмосферных неоднородностей.

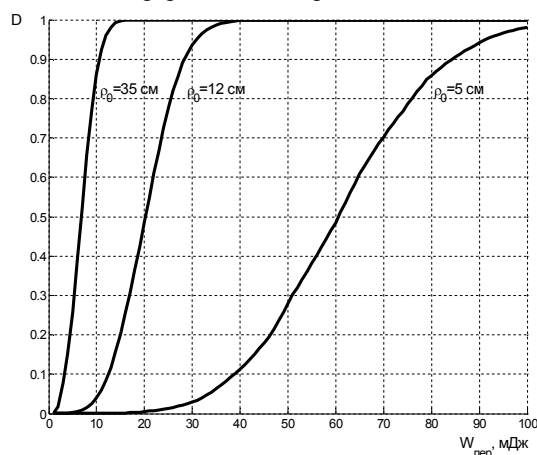


Рис. 1. Зависимость условной вероятности правильного обнаружения эхо-сигнала от энергии зондирующего импульса при различных радиусах корреляции атмосферных искажений

При локации в условиях атмосферы с радиусом пространственной корреляции $\rho_0 = 35$ см уровень энергии зондирующего импульса может быть снижен на порядок при сохранении максимального уровня вероятности обнаружения. Увеличение структурной постоянной показателя преломления атмосферы при наблюдении КО в области горизонта приводит к уменьшению радиуса искажений волнового фронта, что согласно выражению (8) влияет на распределение излучения в области объекта локации и уровень отраженного сигнала.

Кроме пространственного масштаба корреляции атмосферных искажений в характеристиках обнаружения следует учитывать временной масштаб корреляции атмосферных искажений. При передвижении объекта по траектории или с течением времени перед апертурой передатчика оптической системы меняется наклон волнового фронта, что приводит к смещению пятна засветки в плоскости объекта локации.

При минимальном наклоне волнового фронта φ_0 прохождение луча будет соответствовать дифракционному пределу с радиусом ρ_0 . С увеличением φ происходит смещение области главного максимума пятна Эйри, что приводит к уменьшению интенсивности принимаемого излучения.

Оценить степень влияния наклона волнового фронта на обнаружительную способность лазерно-локационной системы можно по диаграммам, приведенным на рис. 2.

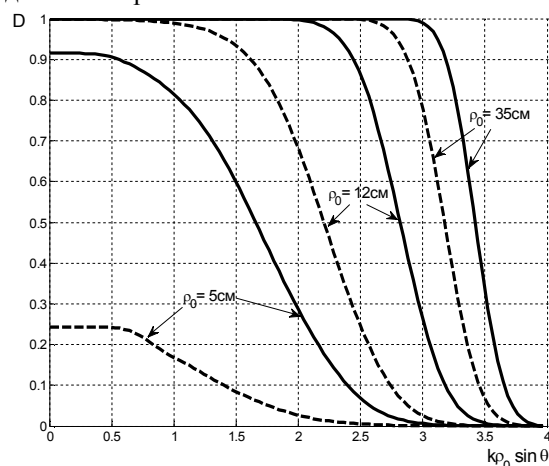


Рис. 2. Зависимость условной вероятности правильного обнаружения эхо-сигнала от смещения пятна засветки на поверхности объекта локации при различных радиусах корреляции атмосферных искажений
— энергия импульса передатчика 85 мДж,
--- энергия импульса передатчика 45 мДж

Данные зависимости (рис. 2) подтверждают влияние наклона волнового фронта на характеристики обнаружения. В некоторых случаях уменьшение интенсивности из-за смещения пятна можно компенсировать увеличением энергии зондирующего импульса. Наиболее эффективный перенос лазерного излучения к поверхности цели может быть осуществлен при достижении минимального смещения центра пятна по отношению к случаю прохождения через волновой фронт с φ_0 . Искажения волнового фронта имеют вихревую природу, поэтому возникают периодические скоррелированные состояния атмосферы, наилучшие для прохождения зондирующего пучка. Как показано в работе [12], частота появления скоррелированных состояний атмосферы зависит от пространственного радиуса корреляции атмосферных искажений.

Для организации эффективной посылки зондирующего импульса достаточно определить частоту появления скоррелированных состояний атмосферных искажений с минимальным наклоном волнового фронта. Частота появления состояний атмосферы с нулевым наклоном волнового фронта в области апертуры передатчика будет определяться пространственным масштабом атмосферных неоднородностей и тангенциальной составляющей скорости перемещения объекта локации. Предельная частота следования зондирующих импульсов, соответствующая эффективному переносу энергии, при локации низкоорбитальных объектов определяется скоростью перемещения самого объекта, а при локации высокоорбитальной группы зависит в основном от степени турбулентности атмосферы. Для спутников с высотой орбиты выше 10 000 км частота реализаций эхо-сигнала ограничивается пространственно-временными характеристиками турбулентной атмосферы на момент локационного сеанса. Повышение частоты передатчика сверх указанного предела будет, скорее всего, нерациональным.

Выводы

Как видно из приведенного материала, атмосферная турбулентность приводит к ослаблению интенсивности излучения вследствие увеличения расходимости зондирующего пучка и изменения пространственного распределения излучения в плоскости объекта локации.

Обеспечение эффективного использования ЛЛС возможно только с учетом флуктуации фазы лазерного излучения в турбулентной атмосфере.

Статистически-скоррелированные смещения фазы позволяют анализировать состояние атмосферы для выбора параметров локационных импульсов, которые будут иметь наименьшие фазовые флуктуации.

Учет пространственной и временной корреляции атмосферных искажений позволяет значительно повысить эффективность обнаружения оптических сигналов и рационально использовать энергетический ресурс лазерного передатчика без применения адаптивной оптической системы.

С помощью полученных зависимостей может решаться задача выбора энергетических и простран-

ственно-временных параметров лазерного дальномера по заданным внешним условиям и характеристикам объекта локации.

Список литературы

1. Свиридов К.Н. Лазерно-оптические средства контроля космического мусора / К.Н. Свиридов // *Космонавтика. Аэрокосмическое обозрение*. – 2006. – № 3. – С. 182-183.
2. *International Laser Ranging Service* [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: <http://ilrs.gsfc.nasa.gov/>.
3. Український центр визначення параметрів обертання Землі [Електронний ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: <http://www.mao.kiev.ua/EOP/UKRAINE/>.
4. Бурмистров Е.В. Методика и алгоритм обнаружения слабых оптических сигналов в дневных условиях при лазерной дальнометрии с высокой частотой повторения импульсов / Е.В. Бурмистров // *Проблемы космических исследований. Электромагнитные волны и электронные системы*. – 2008. – № 4, т. 13. – С. 34-43.
5. Распространение лазерного пучка в атмосфере / С.Ф. Клиффорд, М.Е. Грачева, А.С. Гурвич, А. Исимару, С.С. Кашикар, и др.; под ред. Дж. Стробена. – М.: Мир, 1981. – 415 с.
6. Зуев В.Е. Лазерные навигационные устройства / В.Е. Зуев, В.Я. Фадеев. – М.: Радио и связь, 1987. – 160 с.
7. Сигналы и помехи в лазерной локации // В.М. Орлов, И.В. Самохвалов, Г.М. Креков и др.; под ред. В.Е. Зуева / М.: Радио и связь, 1985. – 264 с.
8. Александров А.А. Адаптивная оптическая система управления лазерным излучением / А.А. Александров, А.В. Кудряшов, А.Л. Рукосуев, Т.Ю. Черезова, Ю.В. Шелдакова // *Оптический журнал*. – 2007. – № 8, Т. 74. – С. 50-55.
9. Оптическая локация. Теоретические основы приема и обработки оптических сигналов: Монография / А.И. Стрелков, Т.А. Стрелкова, А.П. Лытюга, С.В. Москвитин; под ред. А.И. Стрелкова. – Х.: Вировец А.П. «Апостроф», 2010. – 312 с.
10. Лазерная локация / И.Н. Матвеев, В.В. Протопопов, И.Н. Троицкий, Н.Д. Устинов; под ред. Н.Д. Устинова. – М.: Машиностроение, 1984. – 272 с.
11. Гальярди Р.М. Оптическая связь / Р.М. Гальярди, Ш. Карп; пер. с англ. – М.: Связь, 1978. – 424 с.
12. Стрелков А.И. Учет параметров турбулентности атмосферы при формировании зондирующих сигналов лазерных локационных систем контроля космического пространства / А.И. Стрелков, Е.И. Жилин, А.П. Лытюга, И.В. Любич // *Системы обработки информации*. – 2012. – Вып. 9 (107). – С. 92-95. – Рус.

Поступила в редколлегию 5.06.2013

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

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИЯВЛЕННЯ СИГНАЛІВ ЛАЗЕРНИХ ЛОКАЦІЙНИХ СИСТЕМ КОНТРОЛЮ КОСМІЧНОГО ПРОСТОРУ В УМОВАХ ТУРБУЛЕНТНОЇ АТМОСФЕРИ

О.І. Стрелков, Є.І. Жилин, І.В. Любич

У статті проведено аналіз можливості застосування моделі турбулентної атмосфери для задач лазерної локації космічних об'єктів. Розраховано імовірнісні характеристики виявлення лазерних локаційних сигналів в залежності від різних умов спостереження космічних об'єктів.

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

EFFICIENCY SIGNAL DETECTION ANALYSIS OF THE SPACE CONTROL LASER RANGING SYSTEMS IN THE TURBULENT ATMOSPHERE

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

The article analyzes the validity of the turbulent atmosphere model for space objects laser ranging. Calculated the probability detection laser ranging signals characteristics depending on the different space objects observation conditions.

Keywords: laser ranging, space objects, finding out signals, turbulent atmosphere.