
**СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
ДВИЖУЩИМИСЯ ОБЪЕКТАМИ**

УДК 681.396.473

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛАЗЕРНО-ЛОКАЦИОННОЙ
СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПОЛЕТА
БЕСПИЛОТНОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА
В ГОРОДСКИХ УСЛОВИЯХ¹**

© 2021 г. В. М. Лисицын^{а,*}, С. М. Мужичек^а, К. В. Обросов^а

^аФНЦ ФГУП ГосНИИАС, Москва, Россия

*e-mail lvm@gosniias.ru

Поступила в редакцию 13.07.2021 г.

После доработки 20.07.2021 г.

Принята к публикации 26.07.2021 г.

Предложена методика оценки эффективности обеспечения безопасности полета беспилотного транспортного средства в городских условиях лазерно-локационной пилотажной системы, основанная на энергетических расчетах отношения сигнал/шум при обнаружении препятствий типа провод. Оценка эффективности определяется условной вероятностью уклонения от столкновения при нахождении препятствия по курсу летательного аппарата. Получены оценки вероятности уклонения от столкновения с проводом для типовых условий полета. Показана высокая эффективность использования лазерно-локационных систем для обеспечения безопасности полета в городских условиях.

DOI: 10.31857/S0002338821060123

Введение. В настоящее время во многих странах прилагаются значительные усилия по созданию автономных беспилотных транспортных средств (БТС), в том числе летающих, таких, например, как квадрокоптеры для эксплуатации в городских условиях. Навигационная система БТС, как правило, рассматривается на базе комплексирования спутниковой навигации и бесплатформенной инерциальной навигационной системы. Однако для летающих БТС определение собственного положения в системе городской застройки не гарантирует получение информации о нахождении препятствий по маршруту движения, поскольку между зданиями могут быть протянуты провода, тросы, растяжки и т.д., расположение которых не имеет привязки к координатам объектового состава и может оперативно изменяться. Поэтому очевидна необходимость наличия на борту летающего БТС системы обнаружения потенциальных препятствий для обеспечения безопасного полета и построения безопасных траекторий движения БТС. Необходимо отметить, что такие препятствия, как упомянутые провода и тросы, т.е. тонкие протяженные препятствия (ТПП), не могут быть надежно обнаружены с помощью пассивных средств, таких, как телевидение или тепловидение, особенно если ТПП наблюдается не на фоне неба, а на фоне объектов сцены. Проведенные экспериментальные и теоретические исследования показали, что единственным надежным средством обнаружения ТПП, изготовленных, в том числе из неметаллических материалов, являются лазерно-локационные (ЛЛ) системы [1], использование которых для безопасности полета в городских условиях по сути безальтернативно [2, 3].

Для успешного решения задачи обеспечения безопасного полета ЛЛ-система должна зондировать пространство в некотором телесном угле, не только обнаруживая препятствия в направлении вектора скорости БТС, но и для формирования безопасной траектории облета или обхода при обнаружении такого препятствия. Существуют ограничения и взаимосвязь технических параметров ЛЛ-системы для использования в БТС. Длина волны излучения ЛЛ-системы должна быть безопасной для глаз людей, находящихся на зондируемой сцене. Этому условию удовлетворяет эрбиевый волоконный лазер с длиной волны излучения $\lambda = 1.55$ мкм. Максимальная частота излучения для такого лазера составляет 100 кГц. Это соответствует однозначно измеряемому расстоянию 1.5 км, что приемлемо для летающего БТС. Как будет показано ниже, при обнару-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-29-06077-мк).

жении ТПП при условии расположения препятствия по центру диаграммы излучения уровень отраженного сигнала обратно пропорционален углу расходимости этой диаграммы. Поэтому для обеспечения приемлемой вероятности обнаружения таких препятствий необходима концентрация лучистой энергии в малом телесном угле.

Можно считать, что именно ТПП являются наиболее опасным типом препятствий для БТС при выполнении полетов в городских условиях. Для надежного обнаружения городских ТПП на приемлемых расстояниях (200–400 м) при типовых характеристиках ЛЛ-системы угловая расходимость диаграммы излучения не должна превышать 1–2 угл. мин. При сканировании эта диаграмма направленности (ДН) от импульса к импульсу не должна смещаться более чем на половину своего размера. Угловая скорость сканирования такой диаграммой при достигнутых частотах следования зондирующих импульсов ограничена, что приводит при плотном (растровом) зондировании пространства либо к малым полям обзора, либо к низкому темпу обновления информации в поле обзора. Выходом из этого положения может быть использование неплотных прореженных способов сканирования пространства ДН лазерного излучения.

Для оценки качества работы подобной ЛЛ-системы целесообразно произвести количественную оценку безопасности полета БТС в городских условиях. В [4] описан следующий критерий количественной оценки безопасности полета: “частота столкновений в воздухе за час полета”. Такой критерий зависит от характеристик внешней обстановки и не может быть оценен теоретически. Авторами был предложен другой критерий: вероятность уклонения от столкновения с препятствием, находящимся на траектории движения летательного аппарата. Для этого была разработана методика такой оценки. Методика основана на энергетических расчетах отношения сигнал/шум в тракте детектирования отраженного ЛЛ-сигнала и связывает технические параметры и логику работы ЛЛ-системы, режимы полета БТС и характеристики препятствий с оценкой безопасности полета. Для описания предлагаемой методики необходимо получить необходимые расчетные зависимости.

1. Энергетический расчет лазерного локатора при зондировании тонких протяженных препятствий. Рассчитаем энергетический потенциал ЛЛ-системы в режиме обнаружения препятствий и измерения дальности. Расчет потенциала имеет общий характер и не зависит от вида конкретной конструктивной реализации.

Рассмотрим отражающие объекты с диффузной поверхностью, полностью перекрывающей мгновенное поле зрения. В этом случае отраженная объектом мощность излучения в единице телесного угла в направлении приемной апертуры составляет [1, 5]

$$P_{\text{отр}} = \frac{\beta P_{\text{и}}}{\pi} \sqrt{L_{\text{атм}} L_{\text{опт}}} \cos \psi, \quad (1.1)$$

где β – коэффициент диффузного отражения; $P_{\text{и}}$ – импульсная мощность лазерного генератора; $L_{\text{атм}}$ – потери лазерного излучения в приземном слое атмосферы; $L_{\text{опт}}$ – потери лазерного излучения в оптическом тракте ЛЛ-системы при передаче импульса; ψ – угол между направлением лазерного пучка и нормалью к отражающей поверхности.

На фотоприемник попадает часть отраженной мощности, равная

$$P_{\text{пр}} = P_{\text{отр}} \Omega \sqrt{L_{\text{атм}} L_{\text{опт}}}, \quad (1.2)$$

где $\Omega = S_{\text{пр}}/R$ – телесный угол, под которым видна с поверхности отражающего объекта приемная апертура ЛЛ-системы; $S_{\text{пр}} = b^2$ – площадь приемной апертуры ЛЛ-системы; R – расстояние от ЛЛ-системы до отражающего объекта.

Будем считать, что оптический тракт передающего канала идентичен оптическому тракту приемного. Тогда величина $L_{\text{опт}}$ в (1.1) и (1.2) одна и та же. В итоге для нормально расположенной поверхности к оси ДН получаем

$$P_{\text{пр}} = \frac{\beta P_{\text{и}} b^2}{\pi R^2} L_{\text{атм}} L_{\text{опт}}. \quad (1.3)$$

Минимальная (пороговая) мощность $P_{\text{пр. min.}}$, которую способен принять фотоприемник с эквивалентной шумовой полосой Δf и площадкой фоточувствительного элемента $A = l^2$ определяется выражением

$$\frac{1}{P_{\text{пр. min}}} = \frac{1}{P_{\text{пор}}} = \frac{D^*(\lambda)}{\sqrt{A \Delta f}}, \quad (1.4)$$

где $D^*(\lambda)$ – спектральная обнаружительная способность фотоприемника.

Как правило, для приема лазерного излучения с длиной волны λ используют фотоприемники, у которых красная граница $\lambda_{гр}$ совпадает с λ , и поэтому $D^*(\lambda) = D_{\max}$.

Используя (1.3) и (1.4), получаем следующее выражение для отношения сигнал/шум:

$$\frac{S}{N} = \frac{\beta P_{\text{л}} b^2 D_{\max}^* L_{\text{атм}} L_{\text{опт}} K}{\pi R^2 l \sqrt{\Delta f}}, \quad (1.5)$$

где K – коэффициент накопления сигнала.

Выразим потери излучения в атмосфере в виде

$$L_{\text{атм}} = 10^{-0.2\alpha R},$$

где α – погонное затухание излучения в атмосфере, зависящее от метеорологической дальности видимости. Для $K = 1$ запишем (1.5) в виде

$$\frac{S}{N} = \frac{\beta P_{\text{л}} b^2 D_{\max}^* L_{\text{опт}} 10^{-0.2\alpha R}}{\pi R^2 l \sqrt{\Delta f}}. \quad (1.6)$$

Как видно из (1.5), потенциал ЛЛ-системы в случае диффузного отражения не зависит от угла расходимости пучка θ .

Учтем особенности зондирования ТПП при энергетическом расчете. Оценим коэффициент ρ , представляющий собой отношение сигнала от ТПП к сигналу от бесконечной поверхности. Будем считать, что уровень сигнала излучения лазера на плоскости (XOY), перпендикулярной диаграмме направленности, на расстоянии R распределен по нормальному некоррелированному двумерному закону с равными дисперсиями с началом координат в точке пересечения диаграммы направленности с плоскостью

$$U(x, y) = q \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} dx dy, \quad (1.7)$$

где q – коэффициент пропорциональности, а величина σ будет найдена ниже.

Интеграл (1.7) берется с помощью перехода к полярным координатам и в соответствии с [6] для неограниченной поверхности

$$U(x, y) = q 2\pi \sigma^2.$$

С другой стороны, двойной интеграл (1.7) может быть представлен как произведение интегралов

$$U(x, y) = q \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} dx \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{y^2}{2\sigma^2}} dy.$$

Тогда

$$\int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{y^2}{2\sigma^2}} dy = \sigma \sqrt{2\pi}.$$

Для ТПП типа провода диаметром 3 мм, расположенного перпендикулярно диаграмме направленности излучения (считая $\exp(-x^2/2\sigma^2) \approx 1$ при x , близких к 0),

$$U(x, y) = q \sigma \sqrt{2\pi} \Delta x,$$

здесь Δx – толщина троса. Тогда отношение сигналов равно

$$\rho = \frac{\Delta x}{\sigma \sqrt{2\pi}}.$$

При расходимости лазерного луча $\theta = 1$ угл. мин. по уровню 0.5 от максимума σ может быть оценена как

$$\sigma \approx \frac{D}{2\sqrt{2 \ln 2}},$$

где $D = \theta R$ – диаметр сечения диаграммы направленности на расстоянии R по уровню 0.5. В итоге

$$\rho = \frac{2\Delta x}{\theta R} \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}}$$

Приведенные выше оценки сделаны при близком к нулю угле ψ между осью диаграммы направленности излучения и плоскостью, нормальной к ТПП, т.е. при облучении диффузной поверхности в направлении нормали к ней. Для ТПП, расположенного под углом ψ , выражение (1.6) приводится к виду

$$\frac{S}{N} \geq \frac{\beta P_i b^2 D_{\max}^* L_{\text{опт}} 10^{-0.2\alpha R}}{\pi R^2 l \sqrt{\Delta f}} \left(\frac{2\Delta x}{\theta R} \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} \cos \psi \right). \quad (1.8)$$

Полученное значение отношения сигнал/шум является максимально возможным для рассматриваемого случая. Облучение поверхности под углами, отличными от нуля, снижает отраженный сигнал и S/N не более чем пропорционально $\cos \psi$. Например, для $\psi = 60^\circ$ S/N уменьшится на 3 дБ. Кроме того, при зондировании провод может не проходить через центр ДН, что должно быть учтено при проведении энергетического расчета. Поскольку, как отмечено выше, смещение диаграммы направленности производится не более чем на 0.5 значения ее размера, то каждое ТПП зондируется дважды. При этом максимальное расстояние Δ от ТПП до центра диаграммы направленности не превосходит 0.25 ее размера. Такое смещение приводит к ослаблению сигнала и уменьшению отношения S/N приблизительно на 1.3 дБ.

2. Энергетические потери, связанные со сканированием. Определим потери сигнала в тракте детектирования отраженного сигнала за счет сканирования диаграмм направленности входной и выходной оптики.

Диаграммы направленности передающей и приемной оптики осуществляют сканирование пространства и поэтому для обеспечения дальностного интервала, в котором обеспечивается прием отраженного сигнала, сдвинуты на некоторый угол $\Delta\phi$ (будем называть этот интервал глубиной дальности ΔR). Наличие углового сдвига между передающей и приемной диаграммами в процессе сканирования может приводить к появлению мертвой зоны, в которой отраженный сигнал не принимается. Это связано с тем, что в пределах этой зоны принимаемая диаграмма направленности на момент прихода отраженного сигнала не пересекается в пространстве с положением передающей диаграммы, зафиксированной на момент излучения импульса. Поэтому отраженное от цели излучение не попадает в объектив ЛЛ-системы. Мертвая зона может простираться от прямо-передающего модуля до некоторой дальности R_0 и начиная с некоторой дальности R_1 до ∞ .

Начиная с дальности R_0 , которая определяется углом разведения диаграмм $\Delta\phi$, расходимостью луча θ и скоростью сканирования ω , диаграммы начинают пересекаться. На диффузной поверхности зондируемого объекта появляется общий для обеих диаграмм участок S_0 , отражение от которого принимает фотоприемное устройство ЛЛ-системы (рис. 1). По мере дальнейшего удаления объекта площадь S_0 растет, достигает максимума, а затем начинает уменьшаться и становится равной нулю. На рис. 1 обозначено: 1 – приемная диаграмма направленности; 2 – передающая диаграмма направленности; 3, 4 – оси приемной и передающей диаграмм направленности, соответственно; 5 – облучаемый объект; 6 – поперечное сечение приемной и передающей диаграмм направленности на поверхности объекта (увеличено).

В первом приближении можно считать, что дополнительные потери мощности определяются отношением площади, в которой диаграммы пересекаются к площади сечения самой диаграммы Q . Обозначив через $2l$ расстояние между положением оси приемной диаграммы направленности на момент приема сигнала и фиксированным положением передающей диаграммы на момент излучения на расстоянии R от ЛЛ, r – радиус диаграммы направленности на том же расстоянии, получим отношение S_0/Q для осесимметричных диаграмм направленности:

$$\frac{S_0}{Q} = \frac{\int_{-x_0}^{x_0} (y_2(x) - y_1(x)) dx}{\pi \cdot r^2},$$

где $y_2(x) = -l + \sqrt{r^2 - x^2}$; $y_1(x) = l - \sqrt{r^2 - x^2}$; $x_0(r) = \sqrt{r^2 - l^2}$.

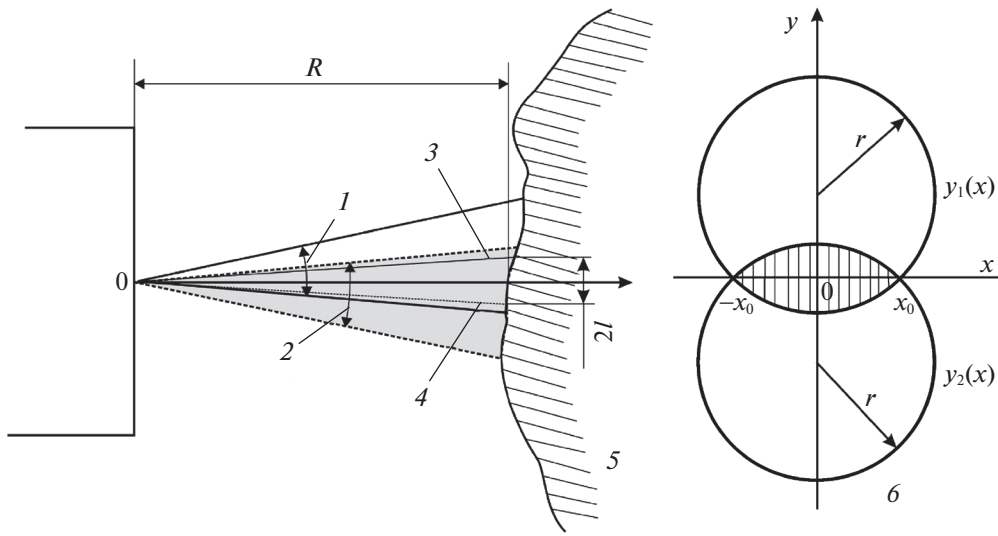


Рис. 1. К расчету потерь сигнала за счет сканирования диаграмм направленности входной и выходной оптики

Произведя необходимые действия, получаем

$$\frac{S_0}{Q} = \frac{2}{\pi} (\arcsin \sqrt{1 - \delta^2} - \delta \sqrt{1 - \delta^2}), \tag{2.1}$$

где $\delta = l/r, 2r = R\theta$.

Значение l определяется как

$$l = \frac{1}{2} (\Delta\phi - \omega t) R.$$

Имея в виду, что $t = 2R/c$, где c – скорость света, получим

$$\delta = \frac{l}{r} = \frac{\Delta\phi - \omega \frac{2R}{c}}{\theta}. \tag{2.2}$$

Диаграммы начинают пересекаться, когда δ становится равной 1, и перестают пересекаться, когда $\delta = -1$ (считая l со знаком). Таким образом минимальное и максимальное расстояния, при которых может быть принят отраженный сигнал, равны соответственно

$$R_{\min} = \frac{1}{2\omega} (\Delta\phi - \theta) c, \quad R_{\max} = \frac{1}{2\omega} (\Delta\phi + \theta) c,$$

и глубина дальности определяется следующим образом:

$$\Delta R = \frac{\theta c}{\omega}.$$

Для ТПП (2.1) сводится к выражению

$$\frac{S_0}{Q} = \frac{\sqrt{r^2 - l^2}}{r} = \sqrt{1 - \delta^2}. \tag{2.3}$$

При этом (2.3) можно рассматривать как оценку сверху потерь от сканирования, поскольку если зондирование происходит в момент, отличный от момента, когда ТПП расположено по центру ДН-излучения, то потери будут меньше.

3. Методика оценки эффективности ЛЛ-системы при выполнении маловысотного полета (МВП).

Под эффективностью ЛЛ-системы будем понимать вероятность безопасного пилотирования $P_{6.п}$, представляющую собой произведение составляющих:

$$P_{6.п} = P_{6.п} P_{6.о},$$

где $P_{6.п}$ – вероятность обнаружения препятствия, находящегося по направлению вектора скорости; $P_{6.о}$ – вероятность безопасного облета (обхода) препятствия.

Для использования методики необходимо задать следующие исходные данные.

1. По БТС:

располагаемая перегрузка n_y ;

скорость полета V ;

время обработки информации и реакции БТС на управляющие воздействия τ .

2. По внешним условиям:

характеристики препятствия;

коэффициент диффузного отражения β ;

состояние атмосферы: показатель поглощения лазерного излучения в атмосфере α (дБ/км);

3. По ЛЛ-каналу задаются некоторые технические характеристики и логика работы.

Принимаются следующие допущения.

1. БТС до обнаружения препятствия движется горизонтально прямолинейно с постоянной скоростью V . БТС после обнаружения препятствия может маневрировать с располагаемой перегрузкой. Начало маневра (обхода) соответствует моменту принятия решения о наличии препятствия плюс некоторое запаздывание, соответствующее времени реакции БТС на управляющие воздействия. БТС обладает достаточной тяговооруженностью для поддержания постоянной скорости V при совершении маневра.

2. Первоначальное значение текущей дальности до препятствия $D_{\text{тек}}$ соответствует заведомо безопасному расстоянию. Препятствие располагается по курсу БТС, т.е. находится в трубке безопасности, за пределами заявленной максимальной дальности действия ЛЛ-системы.

3. В полетном задании есть в наличии цифровая карта местности, и БТС оборудован инерциальной навигационной системой. Таким образом, БТС ориентируется на местности и строит траекторию полета в соответствии с полетным заданием.

Методика носит расчетный характер и заключается в следующем.

1. По V и n_y рассчитывается минимально возможный радиус кривизны траектории R_{\min} при выполнении маневра:

$$R_{\min} = \frac{V^2}{g n_y}, \quad (3.1)$$

где g – ускорение свободного падения.

2. По заданным характеристикам препятствия задаются его размеры (диаметр) и определяется необходимое смещение ΔH для безопасного обхода (облета) относительно текущего направления:

$$\Delta H = H_{\text{БТС}} + \Delta h + R_{\text{т.б}}, \quad (3.2)$$

где $H_{\text{БТС}}$ – собственные габариты БТС, Δh – безопасное смещение БТС относительно препятствия, $R_{\text{т.б}}$ – радиус трубки безопасности полета.

3. По ΔH , R_{\min} , V и τ находится минимальная дальность начала маневра D_{\min} :

$$D_{\min} = V\tau + \sqrt{\Delta H(2R_{\min} - \Delta H)}. \quad (3.3)$$

4. Используя выражение (1.8), рассчитывается среднее отношение сигнал/шум (S/N) при зондировании препятствия. При этом задаются текущая дальность $D_{\text{тек}}$, внешние условия (α , β), характеристики препятствия и ЛЛ-системы.

Вводится поправка на возможное смещение ТПП относительно центра диаграммы направленности (в соответствии с техническими характеристиками ЛЛ-системы). После этого для любого типа препятствий берется поправка на потери, связанные со сканированием в соответствии с выражениями (2.3) и (2.2).

5. Задаваясь вероятностью ложных тревог $P_{\text{л.т}}$ и используя полученное отношение сигнал/шум, определяем вероятность обнаружения отраженного сигнала $P_{\text{обн}}$ при однократном зондировании. Зависимость $P_{\text{обн}}$ от $P_{\text{л.т}}$ при заданном отношении сигнал/шум для экспоненциального распределения мощности отраженного сигнала [7] имеет вид

$$P_{\text{обн}} = \frac{1}{P_{\text{л.т}}^{1+S/N}}. \quad (3.4)$$

6. Рассчитывается количество зондирований N , попадающих на препятствие. Для этого используется текущая дальность $D_{\text{тек}}$, характеристики препятствия, логика работы и характеристики ЛЛ-системы.

7. По $P_{\text{обн}}$ и N определяем ожидаемое количество обнаруженных сигналов от препятствия n :

$$n = P_{\text{обн}} N.$$

8. Для определения вероятности обнаружения препятствия $P_{\text{о.п}}$ будем использовать принятый в радиолокации критерий Q из N , т.е. если траектория сканирования диаграммы направленности пересекает ТПП N раз, то обнаружение произойдет не менее чем в Q случаях. В соответствии с формулой полной вероятности вычисляем $P_{\text{о.п}}$ с помощью выражения

$$P_{\text{о.п}} = \sum_{i=0}^{N-Q} C_N^{Q+i} P_{\text{обн}}^{Q+i} (1 - P_{\text{обн}})^{N-Q-i}, \quad (3.5)$$

где C_N^Q – число сочетаний из N по Q . Задавая минимально допустимой вероятностью обнаружения препятствия $P_{\text{зад}}$, производим сравнение полученной вероятности и заданной: если $P_{\text{о.п}} \geq P_{\text{зад}}$, то препятствие обнаружено с вероятностью не менее заданной; если $P_{\text{о.п}} < P_{\text{зад}}$, то препятствие не обнаружено с заданной вероятностью.

Решение может быть принято и по другому критерию: $n \geq Q$ – препятствие обнаружено; $n < Q$ – препятствие не обнаружено.

9. Если препятствие не обнаружено, то производится расчет текущей дальности для следующего цикла обзора $D_{\text{тек}}$:

$$(D_{\text{тек}})_{i+1} = (D_{\text{тек}})_i - V t_{\text{обз}},$$

где $t_{\text{обз}}$ – период цикла обзора.

10. Если препятствие обнаружено, то сопоставляем текущую дальность $D_{\text{тек}}$ и $D_{\text{мин}}$. Если $D_{\text{тек}} \geq D_{\text{мин}}$, то безопасность полета обеспечена. Таким образом мы получаем дальность обнаружения препятствий с заданной вероятностью правильного обнаружения $P_{\text{о.п}}$. Однако даже если $D_{\text{тек}} \geq D_{\text{мин}}$, то все равно можно перейти на п. 4 и продолжить процедуру до момента $D_{\text{тек}} = D_{\text{мин}}$. Тогда получим вероятность обнаружения на минимально допустимых дальностях $D_{\text{мин}}$. Если препятствие обнаружено, когда $D_{\text{тек}} < D_{\text{мин}}$, то с большой вероятностью произойдет столкновение с препятствием, т.е. безопасность не обеспечена.

Предложенный подход дает возможность считать эквивалентными вероятность обнаружения препятствия $P_{\text{о.п}}$ на дальности не менее $D_{\text{мин}}$, позволяющей уклониться от столкновения, и вероятность безопасного полета $P_{\text{б.п}}$. Схематично методика представлена на рис. 2.

4. Результаты моделирования. Используя предложенную методику, была произведена оценка эффективности информационного обеспечения безопасности пилотирования БТС, оборудованного гипотетической ЛЛ-системой при полете в городских условиях. К ТПП относятся провода, тросы, растяжки и др. Они могут отличаться количеством параллельных структур (провода линий электропередач (ЛЭП), материалом изготовления, диаметром, ориентацией в пространстве, структурой поверхности, коэффициентом отражения и т.д. Однако все они не существуют изолированно, а соединяются с препятствиями других типов (здания, мачты освещения, опоры ЛЭП, элементы рельефа местности и пр.). Поэтому для обнаружения ТПП можно использовать прореженные способы сканирования диаграммой направленности лазерного излучения, которые должны обеспечить не менее заданного количества пересечений траектории сканирования с ТПП при любом его положении относительно направления полета БТС.

Для проведения моделирования были заданы технические характеристики и способ сканирования гипотетической ЛЛ-системой, которая осуществляет зондирование впередилежащего пространства. Центр поля обзора соответствует направлению вектора скорости БТС. Диаграмма направленности ЛЛ-системы движется по трохоиде (рис. 3).

Для полета БТС в условиях городской застройки наиболее опасным препятствием принимается ТПП, имеющее вертикальную проекцию на плоскость, перпендикулярную вектору скорости БТС, так как при этом имеет место наименьшее число пересечений ТПП траекторией движения ДН. Из рис. 3 видно, что количество зондирований N при пересечении провода при любой его ориентации траекторией движения диаграммы направленности лазерного излучения составляет не менее пяти, за исключением концевых участков, на которых $N = 4$. В качестве критерия обнаружения может быть выбран критерий 3 из 4, который позволяет оценить близость

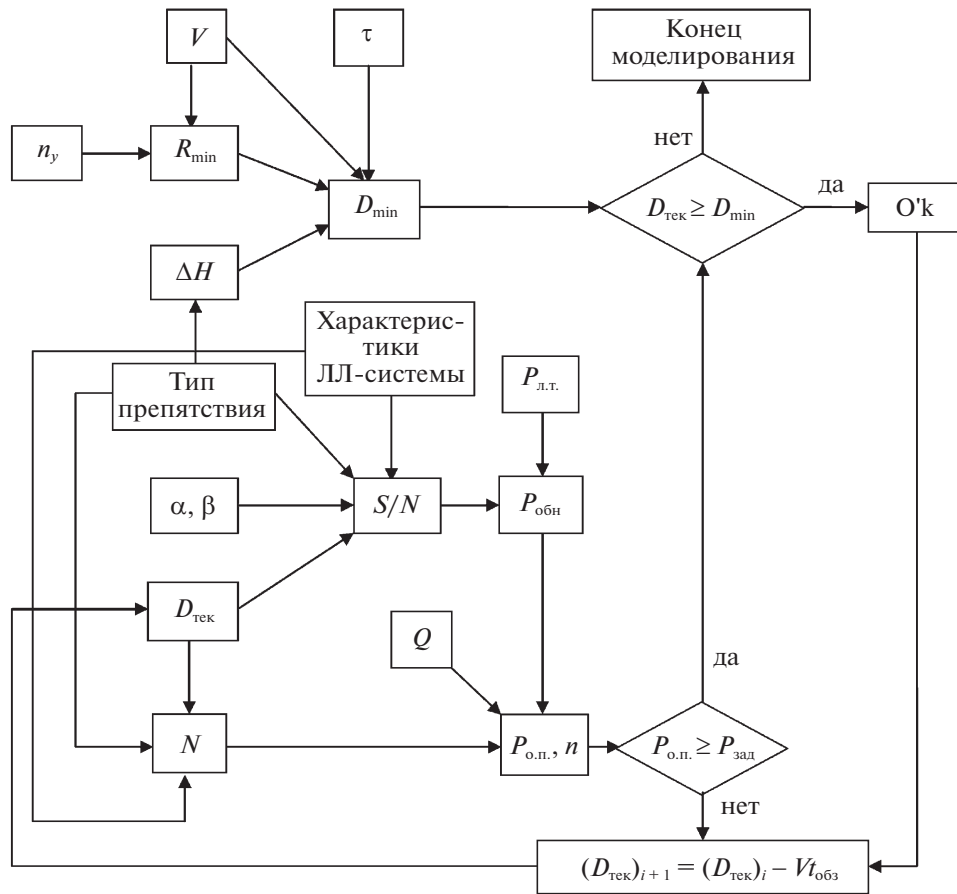


Рис. 2. Методика оценки эффективности ЛЛ-системы при выполнении МВП

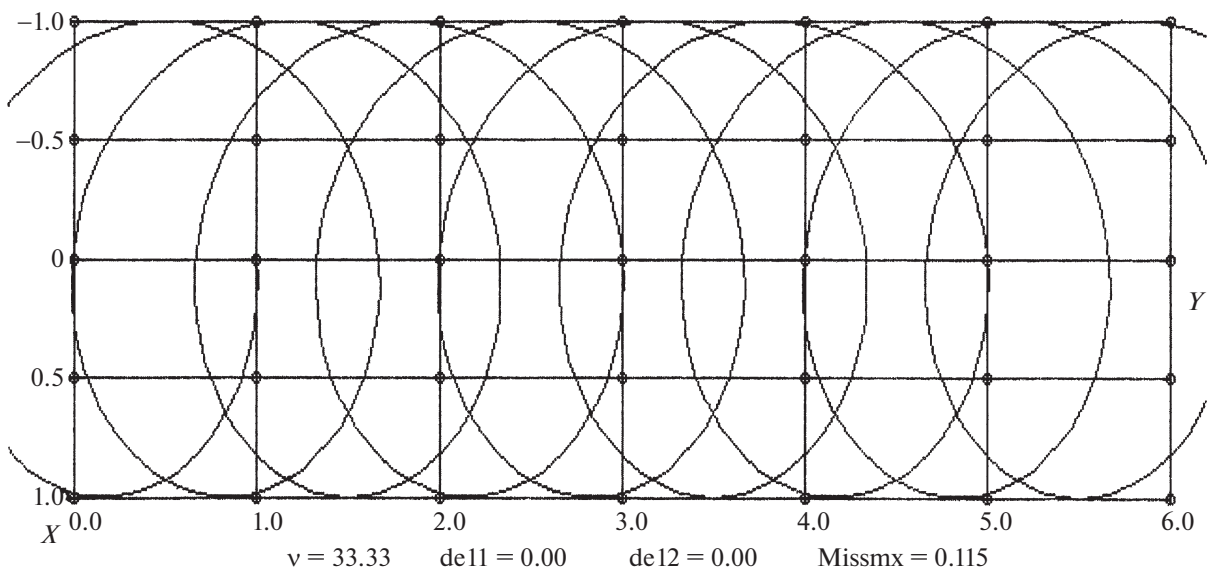


Рис. 3. Траектория движения диаграммы излучения ЛЛ-системы

Таблица 1

Характеристика	Значение
Длина волны излучения лазера	1.54 мкм
Частота повторения импульсов	30 кГц
Расходимость лазерного луча	1 угл. мин
Угол прокачки по азимуту	$\pm 25^\circ$
Угол между осью и образующей конуса круговой развертки	1°
Частота круговой развертки	50 Гц
Диаметр фотоприемного устройства (ФПУ)	50 мкм
Суммарный коэффициент пропускания оптики, $L_{\text{опт}}$	0.67
Полоса пропускания блока обнаружения отраженного сигнала, Δf	300 МГц
Импульсная мощность лазерного излучателя, $P_{\text{и}}$	4 кВт
Площадь приемной апертуры ЛЛ-канала, b^2	$(8.1 \times 10^{-2})^2 \text{ м}^2$
Максимальная спектральная обнаружительная способность ФПУ, D_{max}	$10^{12} \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{Вт}^{-1}$
Диаметр выходной апертуры передающего тракта, a	65 мм
Длительность импульса	3.3 нс
Смещение диаграммы направленности за один цикл излучения	0.62'
Период обзора, с	1
Коэффициент диффузного отражения ТПП, β	0.22
Погонное затухание излучения в атмосфере, α	2 дБ/км

Таблица 2

Расстояние до ТПП, м	$P_{\text{л.т}} = 10^{-3}$		$P_{\text{л.т}} = 10^{-5}$	
	$P_{\text{обн}}$	$P_{\text{о.п}}$	$P_{\text{обн}}$	$P_{\text{о.п}}$
40	0.99673881	0.999936465	0.9945706	0.99982441
60	0.98894767	0.999277832	0.9816474	0.9980282
80	0.97382049	0.996029932	0.9567494	0.98941304
100	0.94923567	0.985564539	0.9168327	0.96295767
120	0.91360984	0.960211363	0.8602037	0.90345245
140	0.8661734	0.91075459	0.7870604	0.79901537
160	0.80719822	0.830154879	0.6997888	0.65132743
180	0.73810356	0.718055144	0.6028309	0.48009747
200	0.66138052	0.583195592	0.5020562	0.31559063
220	0.58031741	0.441491358	0.403747	0.18354348
240	0.49856683	0.310353334	0.313477	0.09424909
260	0.41964866	0.202569989	0.2352212	0.04287431
280	0.34650533	0.123166461	0.1709424	0.01741899
300	0.28120728	0.070188941	0.120701	0.0063971
320	0.22485357	0.037804927	0.0831444	0.00215574
340	0.17765223	0.019438881	0.0561416	0.000678
360	0.1391206	0.009646667	0.0373524	0.00020262
380	0.10833202	0.004672275	0.0246185	5.858E-05
400	0.08414701	0.002232875	0.0161584	1.6671E-05

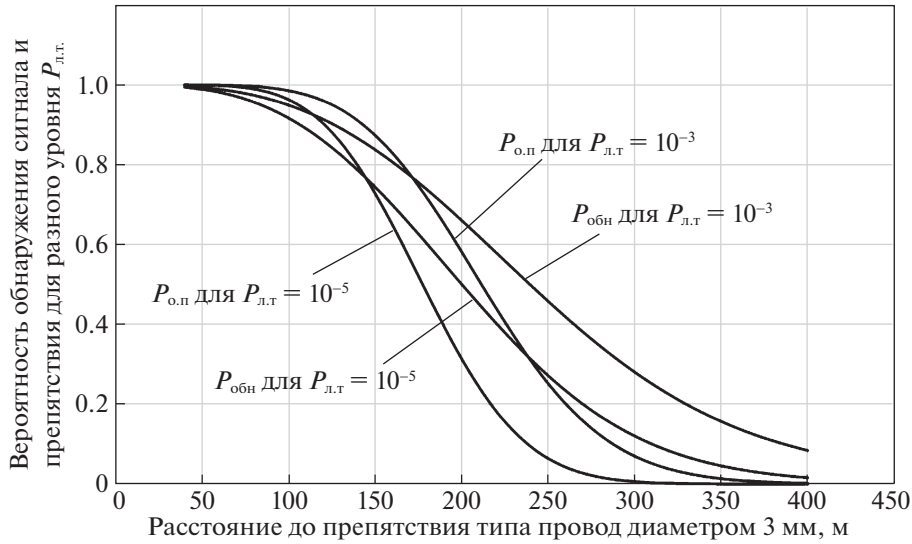


Рис. 4. Зависимость вероятности обнаружения сигнала и препятствия от расстояния до ТПП

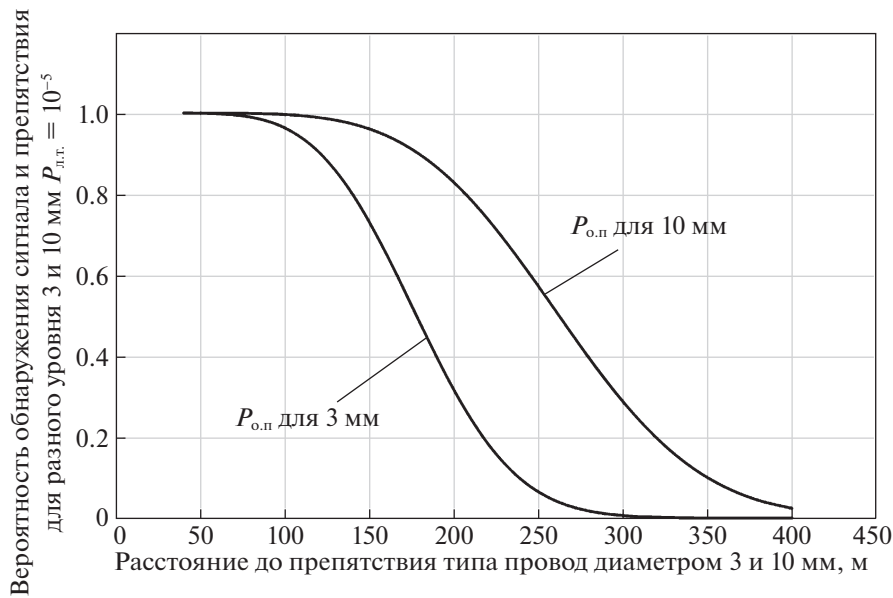


Рис. 5. Зависимость вероятности обнаружения провода диаметром 3 и 10 мм от расстояния до ТПП

ТПП к прямой линии и значительно сократить число ложных срабатываний. Для критерия 3 из 4 выражение (3.5) сводится к виду

$$P_{о.п} = P_{обн}^4 + 4P_{обн}^3(1 - P_{обн}) = 4P_{обн}^3 - 3P_{обн}^4.$$

Основные характеристики ЛЛ-системы и ТПП представлены в табл. 1.

Характеристики гипотетического БТС: располагаемая перегрузка $n_y = 1.5$, скорость полета $V = 20$ м/с, время обработки информации и реакции БТС на управляющие воздействия $\tau = 0.9$ с. Примем собственные габариты БТС $H_{БТС} = 2$ м, минимально допустимое расстояние пролета от провода $\Delta h = 5$ м, а радиус трубки безопасности $R_{т.б} = 3$ м. Таким образом в соответствии с (3.2) $\Delta H = 10$ м. Отсюда, используя выражения (3.1) и (3.3), получаем $R_{мин} = 27$ м, $D_{мин} = 39.1$ м.

В табл. 2 и на рис. 4 представлены зависимости вероятности обнаружения отраженного сигнала от провода диаметром 3 мм $P_{обн}$ и вероятности обнаружения провода $P_{о.п}$ в соответствии

с (3.4) и (3.5) по критерию 3 из 4 от расстояния до ТПП для разного уровня ложных тревог $P_{л.т} = 10^{-3}$ и $P_{л.т} = 10^{-5}$.

На рис. 5 представлены зависимости вероятности обнаружения провода $P_{о.п}$ диаметром 3 и 10 мм по критерию 3 из 4 от расстояния до ТПП при уровне ложных тревог $P_{л.т} = 10^{-5}$.

Из табл. 2 следует, что на минимальной дальности, допускающей уклонение от столкновения, безопасность полета обеспечена с вероятностью $P_{о.п} = 0.9998$ для $P_{л.т} = 0.00001$. Полученные зависимости для ТПП типа провод разного диаметра подтверждают высокую эффективность ЛЛ-систем по обеспечению безопасного использования БТС в городских условиях.

Заключение. Разработанная методика оценки эффективности обеспечения безопасности полета БТС в городских условиях пилотажной ЛЛ-системой, основана на энергетических расчетах. Оценка эффективности определяется вероятностью уклонения от столкновения при условии нахождения препятствия по курсу БТС. Предложенный подход дает возможность считать эквивалентными вероятности обнаружения препятствия на дальности, позволяющей уклониться от столкновения, и вероятности безопасного полета. С помощью данной методики можно исследовать влияние на вероятностные характеристики безопасности полета технических параметров и логики работы ЛЛ-системы, погодных условий, характеристик маневренности и скорости полета БТС, особенностей препятствий без детального моделирования работы системы и зондирования препятствий. Провод произвольной ориентации может рассматриваться в качестве типового препятствия для определения эффективности работы ЛЛ-системы при полете БТС в городских условиях как наиболее сложный объект из всех возможных препятствий. Полученные зависимости вероятности обнаружения проводов разного диаметра подтверждают высокую эффективность ЛЛ-систем, обеспечивающих безопасность полета БТС.

Выражения для энергетических расчетов при зондировании неограниченных поверхностей допускают обобщение методики на случай зондирования различных препятствий, отличных от ТПП, что позволяет проводить оценку безопасности при выполнении маловысотного полета любых типов летательных аппаратов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Основы импульсной лазерной локации / Под ред. В.Н. Рождествина. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГТУ, 2010. 573 с.
2. Дановский В.Н., Ким В.Я., Лисицын В.М., Обросов К.В., Тихонова С.В. Сравнение возможностей радиолокации и лазерной локации как методов информационного обеспечения безопасности маловысотного полета // Изв. РАН. ТиСУ. 2007. № 4. С. 153–165.
3. Лисицын В.М., Себряков Г.Г., Обросов К.В. Использование лазерных локоаторов в перспективных информационных системах летательных аппаратов // Лазеры в науке, технике, медицине: сб. научн. тр. Т. 21 / Под ред. В.А. Петрова. М.: МНТОРЭС им. А.С. Попова, 2010. С. 16–20.
4. Желтов С.Ю., Косьянчук В.В. Общие требования к характеристикам безопасности беспилотных воздушных транспортных средств в едином воздушном пространстве “умного города” // Тез. докл. IV Всероссийск. научно-технической конф. “Моделирование авиационных систем”. М.: ГНЦ ГосНИИАС, 2020. С. 202.
5. Radar Handbook. Editor-In-Chief M.I. Skolnik. McGraw Hill Book Company, 1970.
6. Прудников А.П., Брычков Ю.А., Маричев О.И. Интегралы и ряды. М.: Наука, 1981. 797 с.
7. Дулевич В.Е., Коростелев А.А., Мельник Ю.А. и др. Теоретические основы радиолокации / Под ред. В.Е. Дулевича. М.: Сов. радио, 1978. 608 с.