

УДК: 004.942

Модель авиационного импульсного лазерного дальномера, работающего по аэродинамическим объектам

Долгих А.Е.^{1*}, Жидков П.М.²

¹*Московский физико-технический институт, Институтский переулок, 9,
Долгопрудный, Московская область, 141701, Россия*

²*Корпорация космических систем специального назначения «Комета», ул.
Велозаводская, 5, Москва, 115280, Россия*

**e-mail: sanek_up@mail.ru*

Аннотация

Представлено описание разработанной имитационной модели импульсного лазерного дальномера, установленного на самолете-носителе. Описаны основные структурные части данной модели. На примере трех оптико-геометрических моделей различных аэродинамических объектов оценены оптимальные длительность лазерного импульса и частота выборки фотоприемного устройства лазерного дальномера, в качестве критериев были выбраны максимальная дальность работы и точность измерения дальности.

Ключевые слова: лазерный дальномер, имитационная модель, измерение дальности.

Измерение расстояний между различными телами используется в геодезии, навигации, военном деле и пр. Требования к точности измерения и максимальной

дальности могут сильно отличаться для различных областей применения. Иногда для решения задач измерения расстояния используют пассивную опико-электронную аппаратуру, при этом точность таких измерений невысока [1]. На данный момент одним из наиболее высокоточных приборов измерения дальности является лазерный дальномер (ЛД) [2]. Импульсный лазерный дальномер производит вычисления дальности по времени задержки между излученным импульсом и принятым сигналом (рис. 1). Соответственно, ошибка измерения дальности зависит от точности определения времени задержки отраженного импульса. Входящее в состав ЛД фотоприемное устройство (ФПУ) с высокой частотой выборки по времени позволяет определить время приема отраженного сигнала с необходимой точностью.

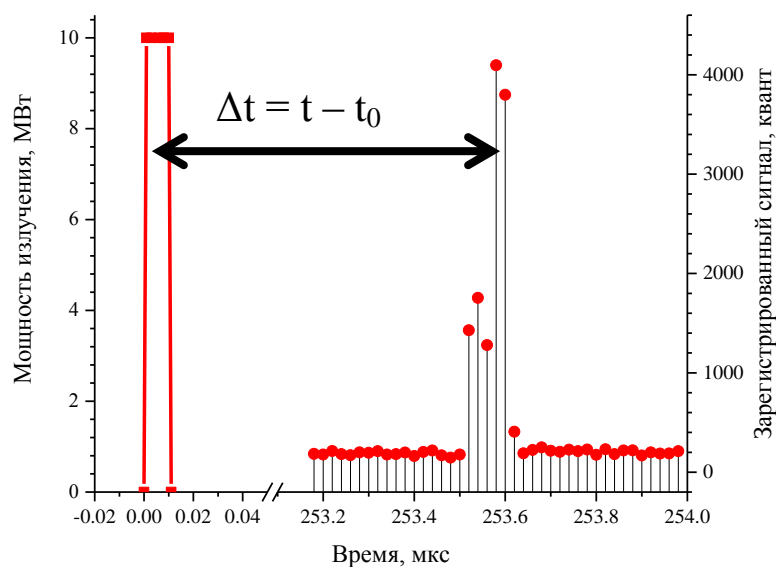


Рис. 1. Излученный импульс и принятый сигнал.

Для определения тактико-технические характеристик (ТТХ) сложных систем обычно используется компьютерное моделирование [3,4]. Данная статья посвящена компьютерной имитационной модели импульсного ЛД авиационного базирования, ее структуре и применению для оценки ТТХ. Компьютерное моделирование часто используется для оценки ТТХ импульсных ЛД различного назначения [5-9].

При построении модели задача ставилась следующим образом: излучатель и ФПУ ЛД установлены на самолете-носителе, измерение дальности проводится для аэродинамических объектов, заданных трехмерными оптико-геометрическими моделями. В модели ЛД учтены движение объектов, генерация лазерного импульса, его отражение от протяженной цели, прием сигнала одноэлементным ФПУ [10] и цифровая обработка информации вплоть до получения дальности. Основной задачей компьютерной модели является определение ТТХ ЛД путем статистического анализа модельных испытаний. Компьютерная реализация модели ЛД была выполнена на языке программирования C++ [11].

Обычно время задержки импульса определяют по его фронту или взвешенному центру [12]. В рассматриваемой предметной области из-за пространственной протяженности целей и конечной продолжительности импульса принятый сигнал может иметь различную форму, как, например, на рис. 1. В данном случае задача по определению фронта принятого сигнала может быть неразрешимой с необходимой точностью. Поэтому для оценки времени задержки использовалась информация о взвешенном центре принятого сигнала:

$$t = \frac{\sum_i I_i t_i}{\sum_i I_i} \quad (1)$$

где t_i – время i -ой временной дискреты ФПУ ЛД, I_i – величина сигнала этой дискреты. Тогда дальность определяется по следующей формуле: $d = \frac{t-t_0}{2c}$. При этом, t_0 – время излучения взвешенного центра лазерного импульса [13,14].

Для расчета величины отраженного сигнала используются трехмерные модели наблюдаемых объектов, представленные набором треугольных примитивов. Отражательные характеристики считаются одинаковыми на всей площади каждого отдельного примитива. Для одного примитива величина принятого ФПУ ЛД сигнала, выраженного в числе фотонов, вычисляется по формулам:

$$N_{\text{от}} = N_{\text{из}} \frac{S \cdot k \cdot \cos \varphi}{2\pi \left(R + \frac{A_{\text{из}}}{2 \sin \alpha} \right)^2 \cdot (1 - \cos \alpha)} \cdot \int_0^R \gamma(\lambda, h(l)) dl \quad (2)$$

$$N_{\text{пр}} = N_{\text{от}} \frac{A_{\text{пр}}^2 \cdot \eta}{2 \cdot R^2} \cdot \int_0^R \gamma(\lambda, h(l)) dl$$

где $N_{\text{из}}$ – количество излученных фотонов; S – площадь примитива; k – коэффициент отражения примитива; φ – угол падения лазерного импульса; R – расстояние от ЛД до примитива; $A_{\text{из}}$ – выходная апертура излучателя; α – расходимость лазерного излучения; $A_{\text{пр}}$ – входная апертура приемного устройства ЛД; η – его квантовая эффективность; $\gamma(\lambda, h)$ – коэффициент, учитывающий оптические характеристики трассы распространения лазерного излучения.

На рис.2 представлена блок-схема модели ЛД. В качестве входных данных модели задаются параметры движения объектов, характеристики излучателя и

приемника ЛД, а также параметры обработки цифровой информации. При моделировании калибровки ЛД генерируется темновой сигнал, шумы которого распределены по нормальному закону. Блок обработки цифровой информации ЛД определяет характеристики шумов по полученному темновому сигналу. Сигналы ФПУ полученные в ходе работы ЛД будут корректироваться на постоянную величину шумов темнового сигнала. Число фотонов, попавших на входной зрачок ФПУ, определяется с помощью карт дальности и облученности, построенных при помощи рендеринга.

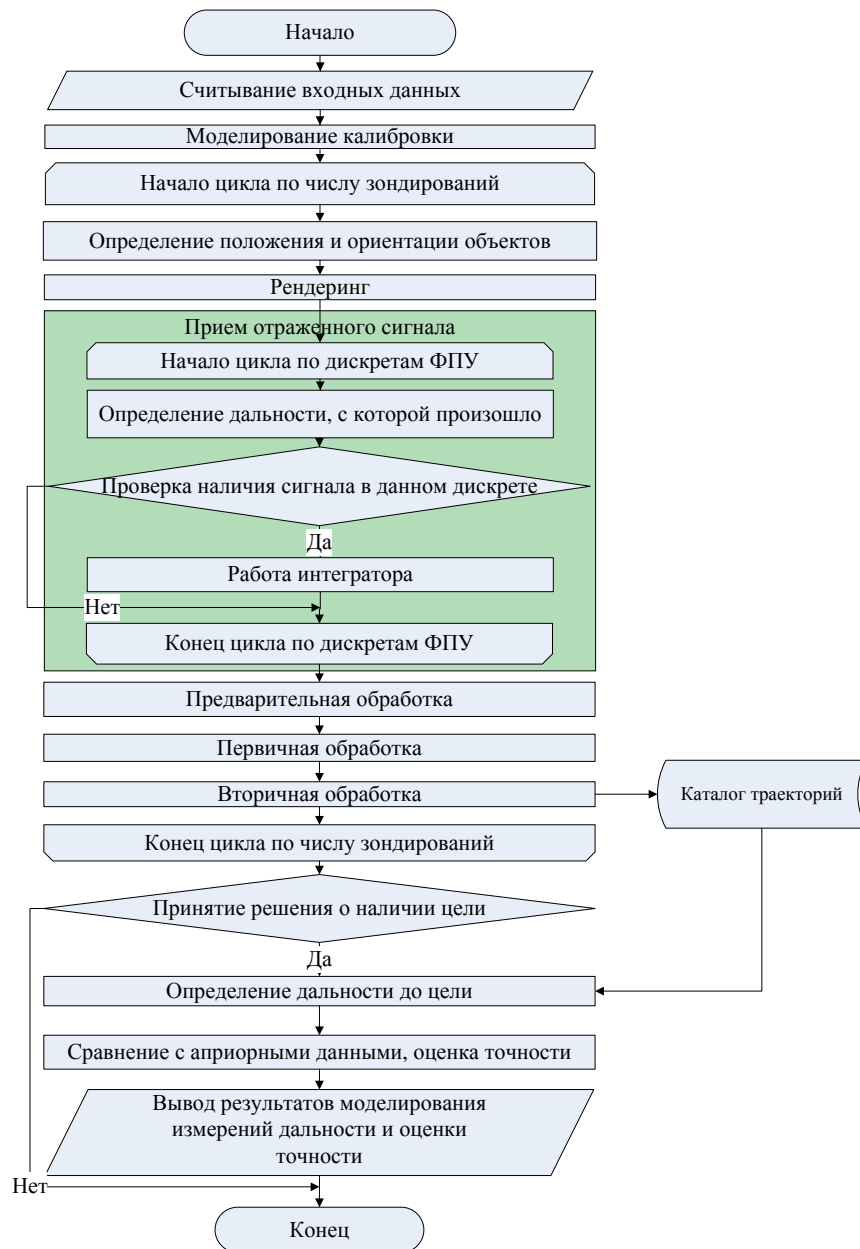


Рис. 2 Схема модели импульсных лазерных измерений дальности

Картами дальности и облученности называются двумерные матрицы, по осям которых отложены визирные углы изображения, формируемого в фокальной плоскости ЛД. В элементах матриц записана информация о частях поверхности наблюдаемого объекта, видимых в данный момент времени, в карте облученности – количество отразившихся фотонов, в карте дальности – расстояние от ЛД до

соответствующей части поверхности. Для учета перекрытия и затенения различных элементов конструкции цели рендеринг осуществляется на основе метода z-буфера [15,16]. При использовании метода z-буфера карты дальности и облученности заполняются одновременно. Если части наблюдаемого объекта перекрывают друг друга, то в соответствующий элемент матриц записывается информация о той части объекта, которая расположена ближе к наблюдателю. На рис.3 представлены карты дальности и облученности, полученные при работе модели ЛД.

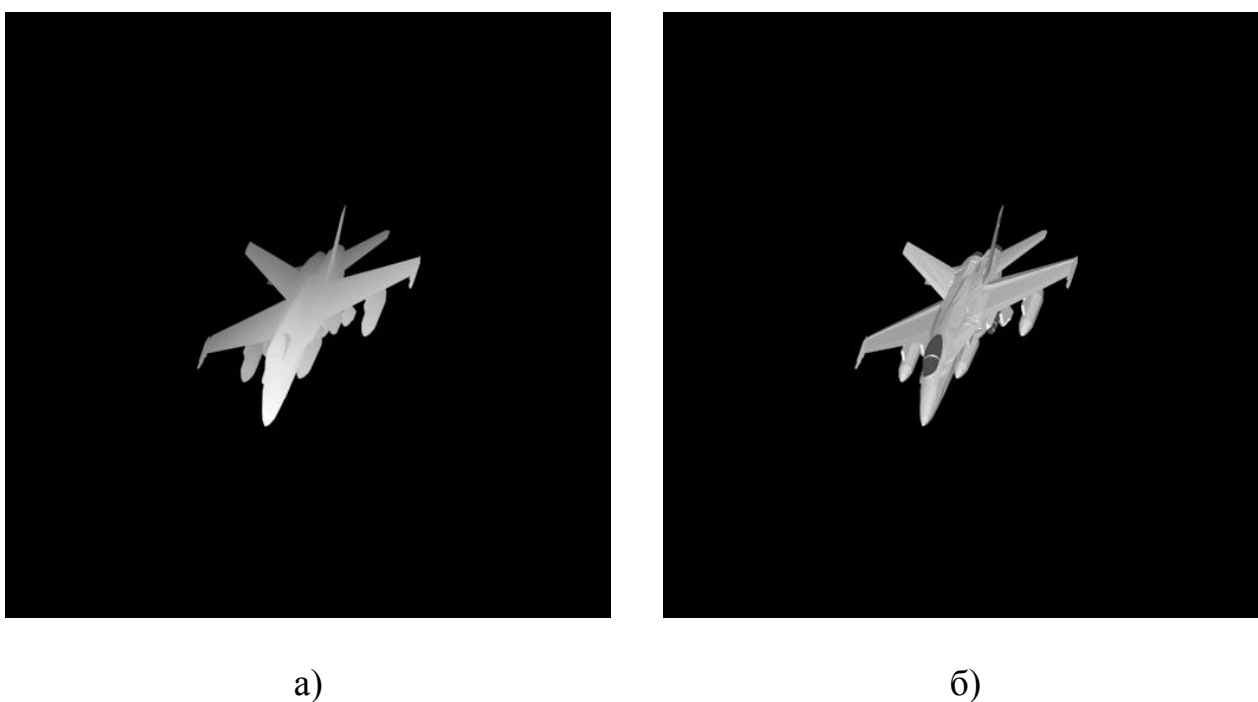


Рис. 3. Карты дальности (а) и облученности (б) самолета Hornet.

ФПУ работает с момента излучения импульса в течение времени, которое позволяет проводить измерения на заданном максимальном расстоянии. Принятый сигнал рассчитывается следующим образом. На каждый временной такт фотоприемного устройства определяется расстояние, с которого должно было произойти отражение. Оценка возможности отражения от наблюдаемого объекта и,

соответственно, наличия сигнала от цели в данном такте ФПУ, определяется по следующим формулам:

$$\begin{aligned} F_2 &< R_{\min}; B_1 > R_{\max}; \\ F_2 &= (t_2 - \Delta t + \tau_{\text{mean}}) \cdot c; \\ B_1 &= (t_1 - \Delta t + \tau_{\text{mean}} - \tau) \cdot c; \end{aligned} \tag{3}$$

где R_{\min} и R_{\max} – минимальное и максимальное расстояния до каких-либо частей наблюдаемого объекта; F_2 – положение фронта импульса на возможный момент отражения; B_1 – положение тыла импульса на возможный момент отражения; t_2 и t_1 – временные границы соответствующего такта ФПУ; Δt – поправка на время полета импульса от предполагаемого места отражения до ЛД; τ_{mean} – взвешенный центр лазерного импульса, считая от его фронта; τ – длительность лазерного импульса. Радиационный шум определяется количеством принятых фотонов и описывается распределением Пуассона [17].

При помощи построенной карты дальности можно определить, от какой части наблюдаемого объекта произошло отражение, принятое в данный временной такт ФПУ. Для определения величины сигнала в этом такте используется карта облученности. Вычисление интегральной суммы сигнала по пикселям, от которых произошло отражение в данный такт ФПУ, в модели выполняет блок интегратора. Также учитывается длительность и форма импульса. Величина принятого сигнала определяется по следующим формулам:

$$I(t_i, \Delta t) = \sum_{\alpha} \sum_{\beta} I'_{\alpha, \beta} \cdot \delta(\alpha, \beta, t_i, \Delta t)$$

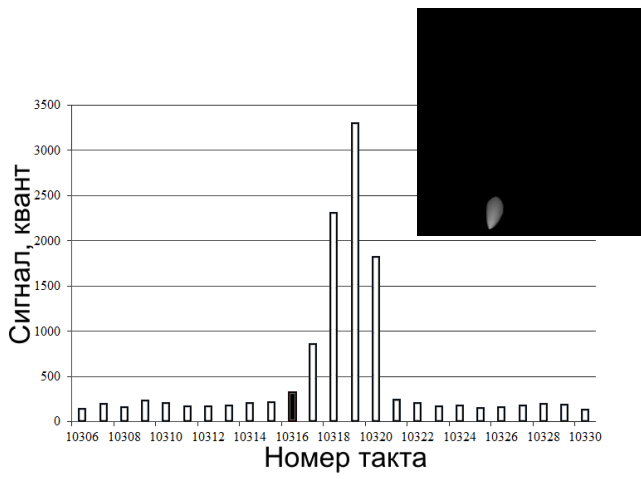
$$\delta(\alpha, \beta, t_i, \Delta t) = \begin{cases} \sum_{i=t_H}^{t_K} P_i, & \text{если } R_{\alpha, \beta} \in [(t_i - \tau)c; (t_i + \Delta t)c] \\ 0, & \text{иначе} \end{cases} \quad (4)$$

$$t_H = \begin{cases} \frac{t_i \cdot c - R_{\alpha, \beta}}{\tau \cdot c} N, & \text{если } R_{\alpha, \beta} < t_i \cdot c \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$$

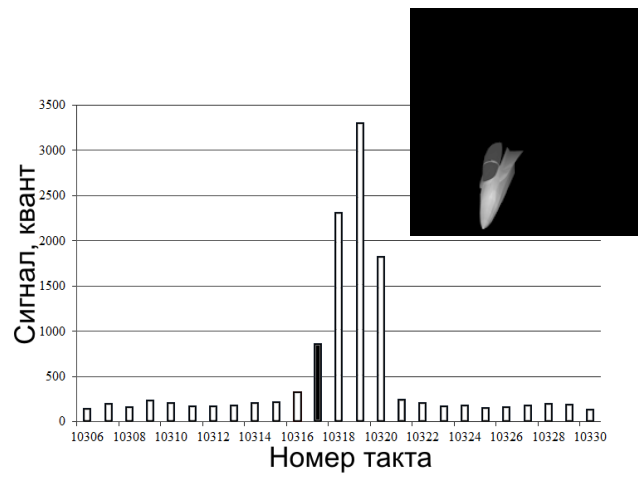
$$t_K = \begin{cases} \frac{(t_i + \tau) \cdot c - R_{\alpha, \beta}}{\tau \cdot c} N, & \text{если } R_{\alpha, \beta} < (t_i + \Delta t - \tau) \cdot c \\ t_{max}, & \text{иначе} \end{cases}$$

где $I(t_i, \Delta t)$ – интенсивность принятого излучения на одну дискрету; t_i – время начала дискреты; Δt – промежуток времени, соответствующий одной дискрете; $I'_{\alpha, \beta}$ – карта облученности; $R_{\alpha, \beta}$ – карта облученности; τ – длительность импульса. P_i – огибающая зондирующего импульса; N – число дискрет, описывающих огибающую; t_H – номер дискреты начала суммирования; t_K – номер дискреты конца суммирования; t_{max} – номер последней дискреты огибающей излученного импульса.

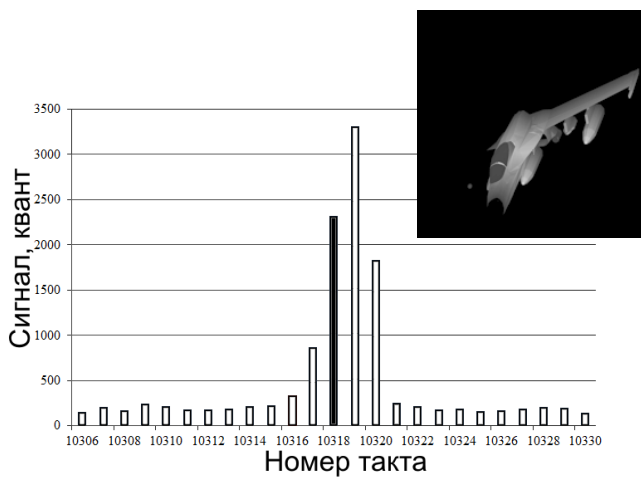
На рис. 4 представлены значения интенсивности в последовательных тактах ФПУ при зондировании лазерным импульсом самолета Hornet. Также представлены те части карты облученности, от которых происходило отражение, принятое в данный такт. В силу протяженности лазерного импульса, отклик от некоторых частей цели может приниматься несколькими последовательными тактами ФПУ.



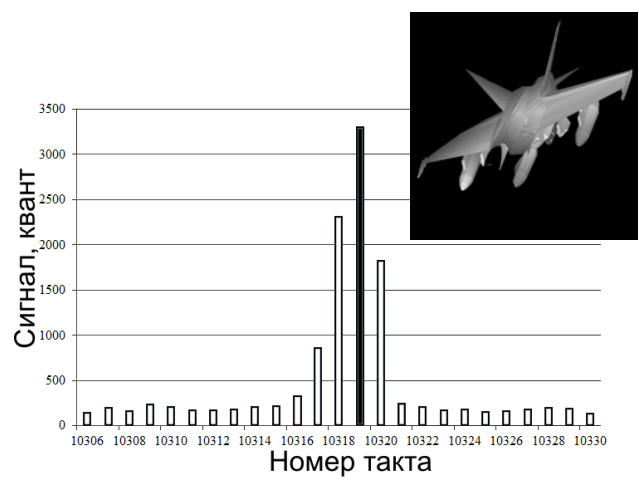
а)



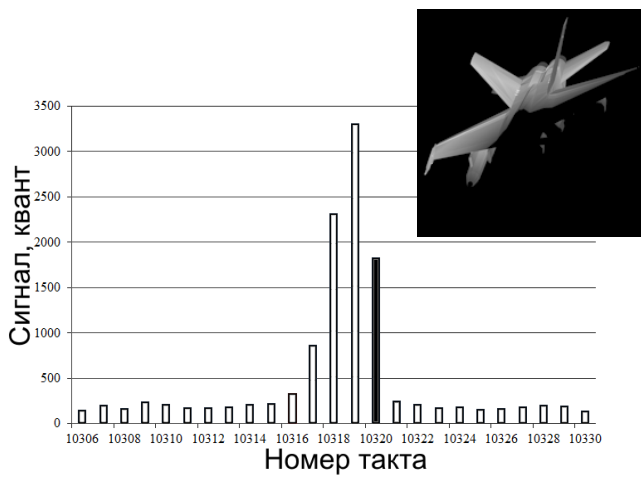
б)



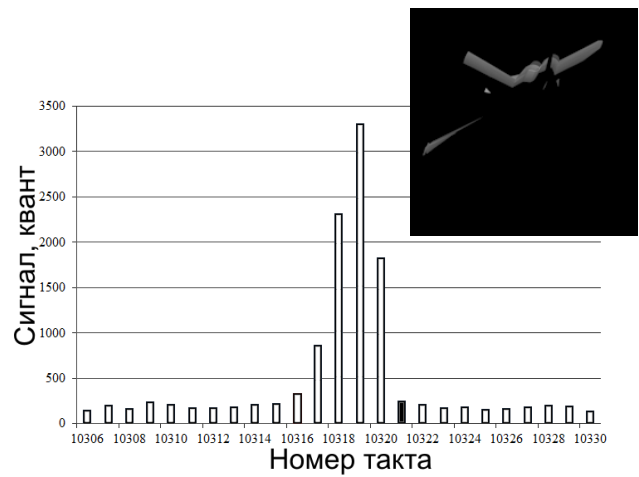
в)



г)



д)



е)

Рис. 4. Прием импульса, отраженного от самолета Hornet последовательными тактами ФПУ ЛД (а-е).

Обработка полученного цифрового сигнала осуществляется в три этапа, характерных для обработки радиолокационной информации [18,19]. В отличие от метода межкадрового накопления сигналов [20] данная обработка устойчива к смещению отклика цели относительно дискрет ФПУ, которое будет наблюдаться при большой относительной скорости. При предварительной обработке цифровой сигнал корректируется на постоянную величину темнового сигнала P_c , которая была рассчитана при калибровке ЛД:

$$D_i = \begin{cases} D_i - P_c, & \text{если } (D_i - P_c) > 0 \\ 0, & \text{если } (D_i - P_c) \leq 0 \end{cases} \quad (5)$$

где D_i – величина сигнала i -ого такта ФПУ.

При первичной обработке определяются номера дискрет ФПУ, в которых произошло превышения заданного порога p . В случае нескольких последовательных дискрет с обнаруженным сигналом ставится общая отметка t , которая вычисляется в соответствии с (1). Предварительная и первичная обработка выполняются на каждое зондирование ЛД. Полученные отметки записываются в каталог траекторий вторичной обработки. В соответствии с размером строба сопровождения принимается решение о продолжении одной из существующих траекторий или завязки новой. При нескольких последовательных пропусках одной из траекторий, соответствующие сигналы принимаются за ложные, и траектория удаляется из каталога. Размер строба сопровождения определяется дискретизацией ФПУ ЛД, а также максимальным теоретическим смещением цели за время, прошедшее между зондированиями:

$$t_{\text{строба}} = \frac{1}{f} + \frac{v_0}{c} T \quad (6)$$

где f – частота дискретизации ФПУ; v_0 – теоретически максимальная относительная скорость наблюдаемого объекта; T – период зондирования. Максимальная относительная скорость привязана не к конкретному наблюдаемому объекту, а является максимальной для всех типов объектов, по которым можно будет работать данным ЛД. При последовательном пропуске нескольких зондирований, величина строба увеличивается в соответствии с:

$$t'_{\text{строба}} = \frac{1}{f} + \frac{v_0}{c} T \cdot \Delta n \quad (7)$$

где Δn – разность номеров зондирований. Если $\Delta n > N_{\text{max}}$, то такой трек принимается за ложный и удаляется. Таким образом, N_{max} отвечает за максимальное количество допустимых последовательных пропусков.

Для селекции истинных и ложных траекторий используется пороговое значение длины траектории. Если таких траекторий несколько, то выбирается траектория с наименьшим значением суммы квадратов отклонений от соответствующей линейной аппроксимации:

$$F = \sum_i (R(t_i) - g(t_i))^2 \quad (8)$$

где $R(t_i)$ – расстояние до цели, измеренное при помощи модели ЛД; $g(t_i)$ – линейная аппроксимация соответствующего трека.

Полученные при помощи модели результаты измеренного расстояния сравниваются с априорными. Априорным расстоянием считается расстояние от ЛД

до предполагаемого центра масс цели. Априорные данные определяются из входных параметров движения объектов.

На примере трех летательных аппаратов (Boeing747, Hornet, Tomahawk) и начальных условиях, заданных в таблице 1, были оценены максимальная дальность работы ЛД и СКО ошибки измерения расстояния до цели. В качестве исследуемых параметров ЛД рассматривались длительность импульса τ и частота дискретизации ФПУ f .

Таблица 1.

Значение исходных данных.

№	Наименование	Значение
1	Период зондирования, мс	20
2	Энергия импульса, мДж	70
3	Длина волны излучения, нм	1064
4	Апертура излучателя, мм	10
5	Апертура приемного устройства, мм	100
6	Квантовая эффективность	0,3
7	Шум считывания, СКО, e^-	30
8	Уровень «подставки», квант	200
9	Разрядность АЦП, бит	12
10	Угол расхождения лазерного излучения, мрад	0,13
11	Поле зрения приемного устройства, мрад	5

Оценка максимальной дальности работы ЛД производилась по достижению уровня отношения сигнал/шум (SNR) границы устойчивых измерений (рис. 5). Для определения значения SNR при заданной дальности до наблюдаемого объекта

моделировалась серия экспериментов, в которых ориентация цели задавалась случайным образом. Верхняя граница SNR_{max} зависит исключительно от шумов считывания и разрядности АЦП:

$$SNR_{max} = \frac{2^{N_{АЦП}} - \mu_{шума}}{\sigma_{шума}} \quad (9)$$

При заданных начальных условиях, $SNR_{max} \sim 130$. Таким образом, при достаточно малой дальности до наблюдаемого объекта происходит насыщение ФПУ и значение $SNR = SNR_{max} = const$. Зависимости для различных летательных аппаратов носят схожий характер, и их можно аппроксимировать линейной функцией логарифма расстояния. Для построения зависимостей на рис. 5 были выбраны следующие значения частоты дискретизации ФПУ и длительности лазерного импульса: $f = 50$ МГц, $\tau = 10$ нс.

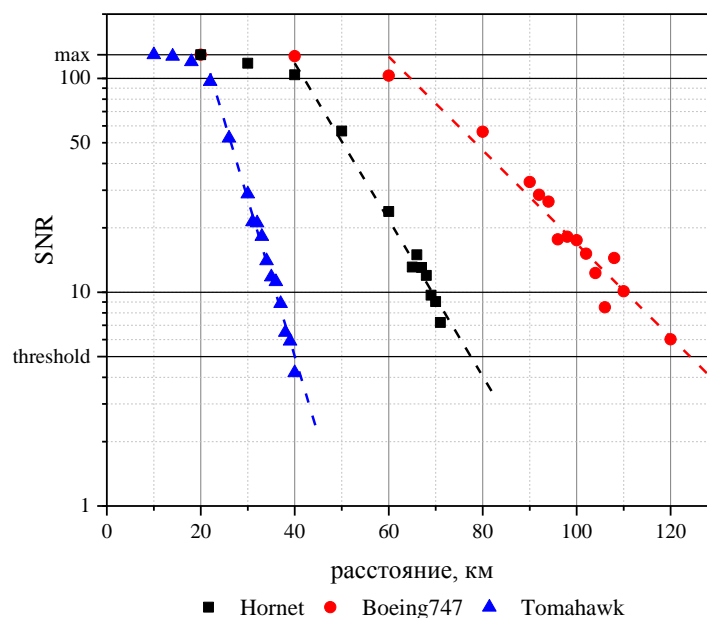
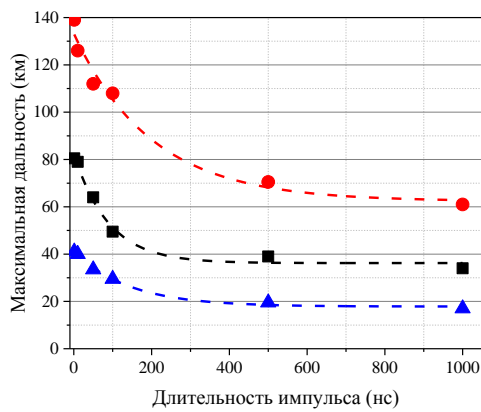


Рис. 5. Зависимость отношения сигнал/шум от расстояния до цели.

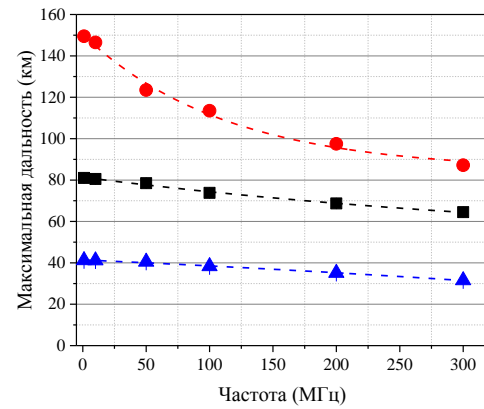
Для расчета СКО ошибки измерения дальности при каждом заданном значении τ и f проводилась серия экспериментов, при которых ориентация цели, а также параметры модели движения цели и самолета-носителя задавались случайным образом. Параметры модели движения задавались таким образом, чтобы поддерживались устойчивые измерения $SNR > 5$. Перед оценкой СКО ошибки измерения дальности, необходимо оценить SNR , чтобы определить границу устойчивых измерений.

Для постоянной частоты дискретизации $f = 50$ МГц были построены зависимости максимальной дальности работы ЛД от длительности импульса (рис. 6 а). При увеличении длительности импульса максимальная дальность уменьшается по экспоненте. Рекомендуется рассматривать длительность лазерного импульса $\tau < 100$ нс, поскольку влияние длительности импульса на максимальную дальность работы ЛД на участке $[0, 100]$ будет наибольшим.

Для постоянной длительности импульса $\tau = 10$ нс были построены зависимости максимальной дальности от частоты дискретизации ФПУ ЛД (рис. 6 б). При увеличении частоты дискретизации максимальная дальность также уменьшается по экспоненте.



а)



б)

■ Hornet ● Boeing747 ▲ Tomahawk

Рис. 6. Зависимость максимальной дальности работы ЛД от а) длительности импульса; б) частоты дискретизации ФПУ.

В соответствии с оценками SNR при помощи модели были проведены исследования зависимости СКО ошибки измерения дальности от длительности импульса τ (рис. 7 а) и частоты дискретизации ФПУ f (рис. 7 б). Точность измерений дальности ухудшается при больших значениях длительности импульса. Для наблюдаемых объектов с большими геометрическими размерами (Boeing747) СКО ошибки измерения дальности увеличивается с увеличением длительности зондирующего импульса.

По построенной зависимости величины СКО ошибки измерения дальности от частоты дискретизации ФПУ f (рис. 7б) определено, что величина СКО ошибки измерения дальности имеет ограничение снизу и после $f_{порога}$ дальнейшее увеличение частоты f не приведет к улучшению точности измеряемой дальности. Ограничение точности измерений дальности до объекта наблюдения связано с его

геометрической структурой. На основании зависимости, построенной для данных летательных аппаратов, частоту предлагается выбрать $f = \max(f_{\text{порога}}) \sim 60$ МГц.

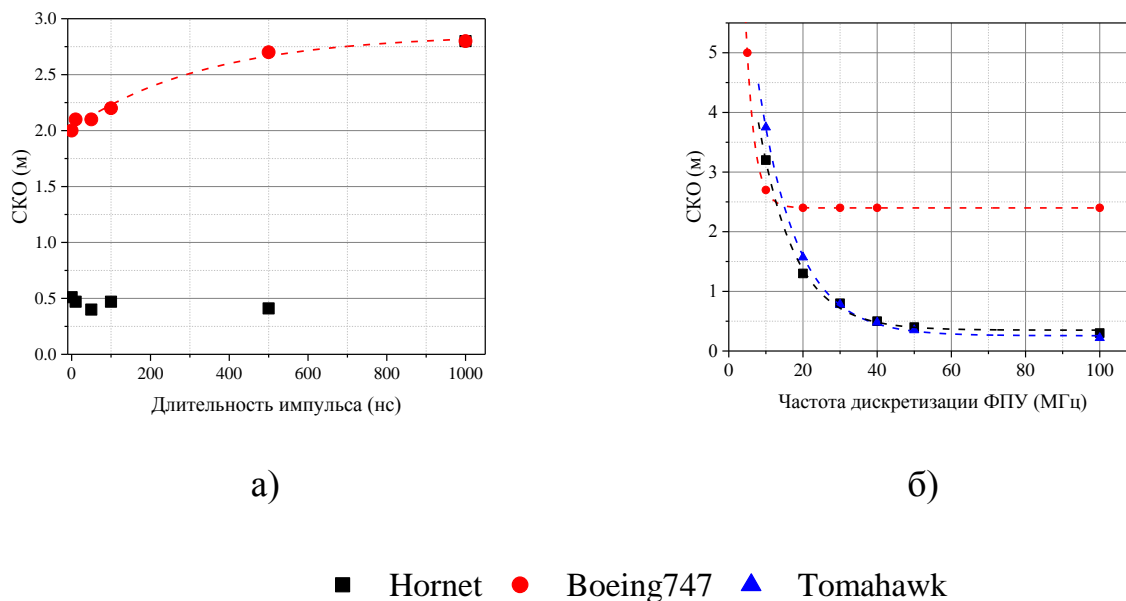


Рис. 7. Зависимость СКО ошибки измерения дальности от а) длительности импульса; б) частоты дискретизации ФПУ.

Выводы

1. Разработана имитационная модель лазерного дальномера авиационного базирования, работающего по аэродинамическим объектам.
2. Учтено движение объектов, процессы отражения лазерного импульса от объекта сложной формы, регистрации сигнала одноэлементным фотоприемным устройством и обработки цифровой информации.
3. На примере трех летательных объектов (Hornet, Boeing747, Tomahawk) при помощи разработанной модели проведены оценки тактико-технических характеристик лазерного дальномера. Максимальная рабочая дальность до объектов составляет 80 км, 140 км и 60 км, соответственно.

4. На основании построенных зависимостей максимальной дальности работы и СКО ошибки измерения дальности предложено использовать лазерный импульс длительностью $\tau < 100$ нс и частоту дискретизации фотоприемного устройства $f \sim 60$ МГц.

Библиографический список

1. Бурага А.В., Костюков В.М. Сравнительный анализ пассивных методов измерения дальности для малого беспилотного летательного аппарата // Труды МАИ. 2012. № 53. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=29624>
2. Бокшанский В.Б., Бондаренко Д.А., Вязовых М.В. и др. Лазерные приборы и методы измерения дальности: – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. – 92 с.
3. Лоу А.М., Кельтон В.Д. Имитационное моделирование: Пер. с англ. – М.: Питер, 2004. – 846 с.
4. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем. – М.: Наука, 1978. - 400 с.
5. Старовойтов Е.И., Савчук Д.В. Программа «МИТРА» для моделирования характеристик бортовых лазерных локационных систем космических аппаратов // Труды МАИ. 2014. № 75. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=49709>
6. Telgarsky R.J., Cates M.C., Thompson C., Sanders-Reed J.N. High Fidelity Ladar Simulation // Laser Radar Technology and Applications. IX International Society for Optics and Photonics, 2004, vol. 5412, pp. 194 - 208.
7. Z. Zang, Y. Zhao, Y Zhang, L. Wu, J. Su, A real-time noise filtering strategy for photon counting 3D imaging lidar // Optics Express, 2013, vol. 21, no. 8, pp. 9247 - 9257.

8. Min S., Kim S., Lee I. Data simulation of Ladar sensor: Focusing on geometric modeling // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, ISPRS, Beijing, China, 2008, vol. 37, pp. 439 - 443.
9. Hao Q., Cao J., Hu Y., Yang Y., Li K., Li T. Differential optical-path approach to improve signal-to-noise ratio of pulsed-laser range finding // Optics express, 2014, vol. 22, no. 1, pp. 563 - 575.
10. Филачев А.М., Таубкин И.И., Тришенков М.А. Современное состояние и магистральные направления развития твердотельной фотоэлектроники. – М.: Физматкнига, 2010. – 128 с.
11. Безлепкина Е.Д., Долгих А.Е., Жидков П.М. и др. Свидетельство государственной регистрации для ЭВМ «Программа для моделирования импульсных лазерных измерений дальности до объектов, заданных трехмерными моделями», № 2017619574, 28.08.2017.
12. Аснис Л.А., Васильев В.П., Волконский В.Б. и др. Лазерная дальнометрия. - М.: Радио и связь, 1995. - 256 с.
13. Richmond R.D., Cain S.C. Direct-detection LADAR Systems. Introduction to LADAR Systems. International Society for Optics and Photonics, 2010. SPIE, Washington, 157 p.
14. Berkovic G., Shafir E. Optical methods for distance and displacement measurements // Advances in Optics and Photonics, 2012, vol. 4, no. 4, pp. 441 - 471.
15. Роджерс Д. Алгоритмические основы машинной графики: Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 512 с.

- 16 Батраков А.С., Иванов В.П. Трёхмерная компьютерная графика / Под ред. Полищука. - М.: Радио и связь, 1995. - 224 с.
- 17 Федосеев В.И. Прием пространственно-временных сигналов в оптико-электронных системах (пуассоновская модель). – М.: Университетская книга, 2011. – 232 с.
- 18 Кузьмин С.З. Основы теории цифровой обработки радиолокационной информации. – М.: Советское радио, 1974. – 432 с.
- 19 Кузьмин С.З. Основы проектирования систем цифровой обработки радиолокационной информации. – М.: Радио и связь, 1986. – 352 с.
- 20 Вильнер В.Г., Ларюшин А.И., Рудь Е.Л. Оценка возможностей светолокационного импульсного измерителя с накоплением // Фотоника. 2007. № 6. С. 22 - 26.