

УДК 623.46.084.2

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ АКУСТООПТИЧНОГО ДЕФЛЕКТОРА ДЛЯ ЛАЗЕРНО-ПРОМЕНЕВОЇ СИСТЕМИ НАВЕДЕННЯ РАКЕТ

Кучеренко О. К.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

E-mail: oleg.k.kucherenko@gmail.com

Роботу присвячено розробці акустооптичного deflectора для лазерно-променевої системи наведення (ЛПСН) ракет. ЛПСН використовують в напівавтоматичних переносних ракетних комплексах для ураження ворожих цілей різного типу. Аналіз способів побудови подібних систем показав, що найбільш перспективними є пристрої з кодово-імпульсною модуляцією з використанням напівпровідникових імпульсних лазерів. У статті приведено схему і описаний принцип дії ЛПСН з кодово-імпульсною модуляцією. Проблемним питанням при впровадженні такої системи є розробка пристрою відхилення лазерного променя, за допомогою якого здійснюється наведення ракети на ціль. Скануючі механічні пристрої, які зараз використовуються, мають складну конструкцію, значні габарити і вагу, обмежену швидкодію. Запропоновано застосувати для відхилення лазерного променя в межах інформаційного поля системи наведення акустооптичний deflectор, який позбавлений вказаних недоліків, оскільки заміняє механічний пристрій сканування на електронний. Метою статті є визначення основних параметрів акустооптичного deflectора.

Розглянуто принцип дії акустооптичного deflectора. Зазначено, що низькі значення акустичних втрат ($\alpha_s < 1$ дБ/см) властиві стеклам на основі халькогенідів германію, зокрема склу складу $Ge_{2.17}As_{39.13}S_{58.70}$. Зазначається, що найбільший кут відхилення лазерного променя спостерігатиметься за умови дифракції Брегга. Приводяться співвідношення, за допомогою яких можна визначити основні характеристики deflectора: кут відхилення лазерного променя, частоту модуляції акустичної хвилі, роздільну здатність, швидкодію та інші. З використанням приведених співвідношень для типових параметрів існуючої системи наведення розраховані значення вказаних характеристик.

Ключові слова: лазерно-променева система наведення; акустооптичний deflectор; визначення основних характеристик deflectора.

Вступ. Постановка проблеми

Лазерно-променеві системи наведення (ЛПСН) використовують в напівавтоматичних переносних ракетних комплексах (НПК) призначених для ураження нерухомих і рухомих броньованих цілей та інших об'єктів, які мають комбіновану, рознесену або монолітну броню, в тому числі з динамічним захистом, а також малорозмірних цілей типу довготривалих вогневих точок, легко броньованих об'єктів і вертольотів.

Всі комплекси такого призначення зазвичай містять канали стеження за ціллю і ракетою, яку випускають для ураження цілі. Канал стеження за ціллю включає візирний пристрій з приводами горизонтального і вертикального наведення. Оператор використовує приводи для утримання перехрестя прицілу на цілі під час польоту ракети. Завдання каналу стеження за ракетою полягає в утриманні ракети на лінії візування цілі (ЛВЦ) з метою влучення і знешкодження цілі.

Для реалізації каналу стеження за ракетою можуть бути використані системи телеуправління з амплітудною, частотною, кодово-імпульсною модуляцією [1, 2]. Найбільш перспективними вва-

жаються системи кодово-імпульсної модуляції з використанням імпульсних напівпровідникових лазерів. Однією з важливих задач при розробці такої системи є вирішення питання відхилення лазерного променя в межах інформаційного поля стеження за ракетою.

Існуючі наразі системи використовують складні пристрої сканування з механічними приводами, що суттєво ускладнює конструкцію, знижує швидкодію і надійність, збільшує масо-габаритні параметри.

У статті запропоновано застосувати для відхилення лазерного променя акустооптичний deflectор (АОД), який позбавлений вказаних недоліків.

Мета статті – визначення основних параметрів акустооптичного deflectора для реалізації каналу стеження за ракетою для ЛПСН.

Канал стеження за ракетою для ЛПСН

Принцип дії каналу стеження за ракетою пояснює схема, яку наведено на рис.1. Оператор за допомогою оптико-візуального або тепловізійного прицілу виявляє та розпізнає ціль, а після пуску

ракети утримує перехрестя прицілу (прицільну мітку) на цілі протягом всього часу польоту ракети. У момент пуску ракета «вистрілюється» в лазерний промінь і телеорієнтується по його осі, що збігається з ЛВЦ оператором.

В існуючих системах лазерний промінь сканується в межах інформаційного поля за допомогою оптико-механічних скануючих пристроїв з механічними приводами. У статті запропоновано застосувати акустооптичні дифракційні дефлектори 4 і 8 з електронним блоком керування 9. Завдяки такій системі керування ракета влучає в ціль.

Кожна з гілок пристрою забезпечує пошук цілі та керування ракетою по одній з осей координат. Наприклад, лазер 2 визначає координати ракети в горизонтальній площині, а лазер 13 в вертикальній площині.

Принцип відхилення лазерного променя в горизонтальній і вертикальній площинах у межах інформаційного поля ілюструє рис. 1,б). Випромінювання лазерів формується об'єктивами 3 і 14.

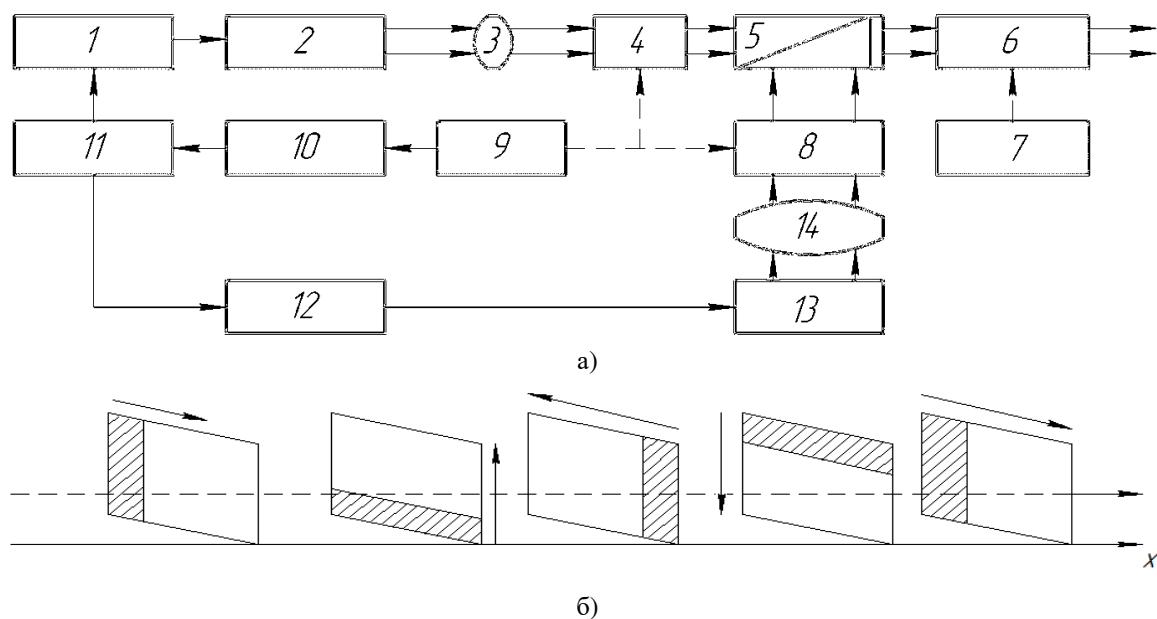


Рис.1. Схема, що пояснює принцип дії каналу стеження за ракетою для ЛПСН, де: а) блок-схема каналу стеження; б) схема відхилення лазерного променя в межах інформаційного поля

Електронний блок керування акустооптичними дифракційними дефлекторами отримує сигнали від фотоприймача, який розташований в хвостовій частині ракети, і, таким чином, визначає положення ракети в даний момент часу. Керування ракетою починається з того моменту, коли електронний блок керування пристрою отримує перші сигнали від фотоприймача. Інформація з електронного блоку керування поступає на датчик кута повороту ракети 10, після якого шифратор 11 формує керуючі команди на модулятори лазерного випромінювання 1 і 12. Лазери виробляють певну послідовність кодованих оптичних імпульсів, що передаються через фотоприймач на борт ракети для керування рулями ракети з метою направлення ракети на ціль і ураження цілі.

Для оптичного поєднання гілок горизонтального і вертикального наведення ракети і направлення лазерних променів у вхідну зіницю панкратичної оптичної системи використовується призма Глана 5. Панкратична оптична система 6 з механічним приводом 7 поступово змінює кутове розхо-

дження лазерних променів на виході ЛПСН протягом польоту ракети від старту до влучення в ціль. На початковій ділянці траєкторії руху ракети кутове розходження лазерного променя повинно бути суттєво більшим, чим на кінцевій ділянці траєкторії. Завдяки цьому забезпечується надійне «вистрілювання» ракети в лазерний промінь.

Основні теоретичні положення, що характеризують роботу акустооптичного дефлектора

Акустооптичний ефект полягає в періодичній зміні показника заломлення оптичного матеріалу під дією ультразвуку [3].

Сучасні АОД характеризуються низкою ознак. Найважливішою серед них є значення коефіцієнта акустооптичної якості M_2 , який, в першу чергу, залежить від швидкості поширення ультразвукових хвиль, фотопружних постійних, густини та показника заломлення середовища взаємодії світлової і акустичної хвиль.

Особливо низькі значення акустичних втрат ($\alpha_b < 1 \text{ дБ/см}$) притаманні стеклам на основі халько-

генідів германію, зокрема скло складу $\text{Ge}_{2,17}\text{As}_{39,13}\text{S}_{58,70}$ [4].

Усередині оптичного матеріалу під дією ультразвукової хвилі формується періодична ґратка зі змінним значенням показника заломлення. Відхилення показника заломлення може бути незначним і складає $10^{-4} - 10^{-6}$ при інтенсивності звукової хвилі $P = 1 \text{ Вт/см}^2$.

В якості збуджувача ультразвукової хвилі використовується п'єзоелемент на основі ніобата літійу LiNbO_3 . Зміна показника заломлення оптичного матеріалу в напрямку осі z здійснюється за законом:

$$n(z, t) = n_{\text{сеп}} + \Delta n \cdot \sin(ft - kz),$$

де $n_{\text{сеп}}$ – середнє значення показника заломлення; f – частота ультразвукових коливань; Δn – зміна показника заломлення під дією ультразвуку; k – стала дифракційної ґратки.

Лазерний промінь, що падає на бічну поверхню дефлектора, дифрагує, відхиляючись на певний кут. Найбільше відхилення лазерного променя спостерігається при куті падіння Бреґґа, значення якого дорівнює:

$$\theta_{\text{Бр}} = \arcsin \frac{\lambda}{\Lambda}, \quad (1)$$

де λ – довжина хвилі лазерного випромінювання; Λ – період дифракційної ґратки акустооптичного дефлектора.

Кут відхилення лазерного променя зазвичай не перевищує 10° , тому для його визначення можна скористатися лінійним наближенням [5]:

$$\Delta\theta_d = (p\lambda/nv)f \quad (2)$$

де $\Delta\theta_d$ – кут відхилення лазерного променя; p – номер дифракційного максимуму; λ – довжина хвилі лазерного випромінювання; n – показник заломлення скла дефлектора; v – швидкість звука; f – частота акустичної хвилі.

Найбільше відхилення лазерного променя спостерігається для першого порядку дифракційного максимуму, тому в подальшому приймемо $p = 1$.

Однією з найважливіших характеристик будь-якого пристрою, що відхиляє, є число розв'язуваних максимумів, або роздільна здатність світлового пучка N . Для одновимірного дефлектора N дорівнює:

$$N = \Delta\theta_d / \varphi_d, \quad (3)$$

де φ_d – кутова ширина світлового пучка на виході з дефлектора.

Якщо кут обумовлений лише дифракційними ефектами, то φ_d дорівнює [5]:

$$\varphi_d = \mu\lambda/nd, \quad (4)$$

де μ – коефіцієнт, залежний від структури пучка та обраного критерію роздільної здатності; d – діаметр лазерного променя.

Зазвичай використовується критерій Релея, згідно з яким дві сусідні світлові плями вважають-

ся роздільними, якщо максимум інтенсивності світла в одній збігається з першим нулем інтенсивності в іншій. Для однорідного пучка прямокутного перерізу $\mu = 1$, для однорідного пучка круглого перерізу $\mu = 1,22$, для гаусового пучка, обмеженого на рівні e^{-2} за інтенсивністю $\mu = 1,34$.

Як видно з рис. 1.6, для ЛПСН формується лазерний пучок прямокутного перерізу, тому приймемо $\mu = 1$, і тоді (4) прийме значення:

$$\varphi_d = \lambda/nd. \quad (5)$$

Підставивши (2) і (5) в (3), отримаємо:

$$N = f \cdot d/v = f \cdot \tau, \quad (6)$$

де $d/v = \tau$ – час проходження пружної акустичної хвилі через апертуру світлового пучка.

Величина τ визначає швидкодію дефлектора, оскільки не можна перевести скануючий промінь з одного положення в інше швидше, ніж за час, необхідний для того, щоб по всій апертурі d встановилася акустична хвиля нової частоти.

Співвідношення (6), що пов'язує дві найважливіші характеристики роздільності і швидкодію, є основним в теорії дифракційних дефлекторів. З нього випливає, що є два шляхи підвищення роздільної здатності N : збільшення апертури світлового пучка d і частоти акустичної хвилі f .

Смуґа частот акустооптичного дефлектора залежить від швидкостей розповсюдження ультразвукових хвиль [6]:

$$\Delta f = \frac{1,8nv^2}{\lambda fL}, \quad (7)$$

де L – довжина взаємодії світлової й акустичної хвиль, що дорівнює ширині п'єзоелектричного збуджувача акустичних коливань.

Іншим важливим параметром акустооптичних дефлекторів є керуюча акустична потужність $P_{\text{ак}}$, яка залежить від властивостей середовища взаємодії світлової й акустичної хвиль і дорівнює [7]:

$$P_{\text{ак}} = \lambda^2 H / 8LM_2,$$

де H – висота п'єзоелектричного збуджувача акустичних коливань.

Акустооптичний дефлектор, виконаний на основі халькогенідного скла складу $\text{Ge}_{30}\text{As}_5\text{Se}_{65}$ для сканування світлового променя в смузі частот $\Delta f = 19 \text{ МГц}$ потребує $\sim 0,1 \text{ Вт}$ керуючої потужності [5].

Визначення основних характеристик акустооптичного дефлектора для ЛПСН

Для визначення основних характеристик акустооптичного дефлектора для ЛПСН потрібно застосувати кут поля зору оптичної системи, який відповідає кутовому розміру інформаційного поля ЛПСН. У межах цього кута має відбуватися відхилення лазерного променя системи керування ракетою. Типове значення кута поля зору оптичної системи наведення для ЛПСН складає $\Delta\theta_d = 40 = \pm 0,06 \text{ рад}$ [8].

В якості матеріалу дефлектора візьмемо халькогенідне скло $\text{Ge}_{2.17}\text{As}_{39.13}\text{S}_{58.70}$ з параметрами: швидкість розповсюдження акустичної хвилі $v = 2686 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$; коефіцієнт акустооптичної якості $M_2 = 270 \cdot 10^{-15} \text{ с}^3 \cdot \text{кг}^{-1}$; середня довжина хвилі спектрального пропускання $\lambda = 1,5 \text{ мкм}$; показник заломлення $n = 2,3$; $p=1$ [5]. Тоді, скориставшись формулою (2), знайдемо частоту коливань акустичної хвилі $f = 247 \text{ МГц}$.

Графіки залежності роздільної здатності акустооптичного дефлектора N від довжини ультразвукової хвилі (або частоти) при довільно вибраному діаметрі світлового променя d приведені на рис. 2 [5]. З графіків видно, що роздільна здатність зменшується при збільшенні довжини ультразвукової хвилі і збільшується при збільшенні діаметру лазерного променя, який має бути узгоджений з розмірами дефлектора.

При діаметрі лазерного променя $d = 2 \text{ см}$ і довжині ультразвукової хвилі 36 мкм роздільна здатність, або число вирішувальних світлоелементів в межах вихідної апертури дефлектора, складатиме 420.

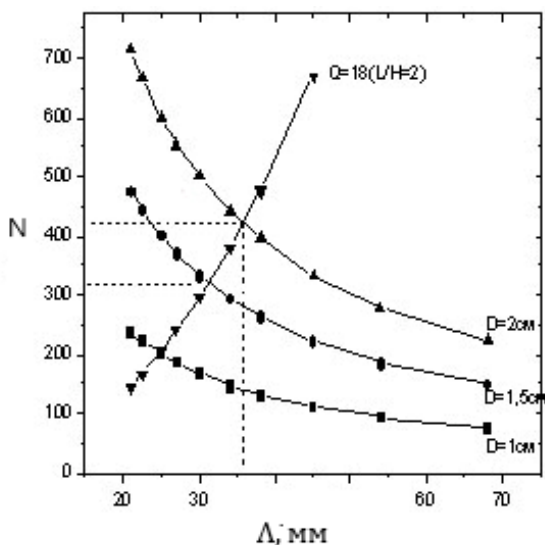


Рис. 2. Залежність роздільної здатності дефлектора на халькогенідному склі $\text{Ge}_{2.17}\text{As}_{39.13}\text{S}_{58.70}$ від довжини ультразвукової хвилі

Важливою характеристикою дефлектора для ЛПСН є швидкодія дефлектора, яка визначає час проходження пружної хвилі через апертуру світлового пучка. Скориставшись співвідношенням (6) при роздільній здатності $N = 420$ і $f = 247 \text{ МГц}$, отримаємо $\tau = 1,7 \cdot 10^{-6} \text{ с}$.

Для визначення смуги частот Δf акустооптичного дефлектора скористаймося типовими значеннями лінійних розмірів збуджувача акустичних коливань, що дорівнюють: $L = 5 \text{ мм}$; $H = 4 \text{ мм}$ [6].

З (7) отримаємо $\Delta f = 16,12 \text{ МГц}$. Максимальне відхилення лазерного променя буде спостерігатись

при його падінні на бічну поверхню дефлектора під кутом Брегга.

Для реалізації ЛПСН використаємо напівпровідниковий імпульсний лазер L 11854-307-0,5, що виробляє фірма Hamamatsu. Лазер генерує випромінювання на довжині хвилі $\lambda = 0,905 \text{ мкм}$. Враховуючи, що $\Lambda = \frac{v}{f} = 10,9 \text{ мкм}$, відповідно до (1) отримаємо $\theta_{\text{бр}} = 8^\circ$.

Висновки

Аналіз відомих схемотехнічних рішень показав, що найбільш перспективним напрямком розробки ЛПСН є використання системи телеуправління з кодово-імпульсною модуляцією. Водночас, в якості джерела випромінювання доцільно застосувати напівпровідниковий імпульсний лазер.

Існуючі скануючі системи відхилення лазерного променя мають суттєві недоліки: складність конструкції, що знижує швидкодію і надійність, значні масо-габаритні параметри. В роботі запропоновано застосувати для відхилення лазерного променя в межах інформаційного поля акустооптичний дефлектор, завдяки чому механічна система сканування замінюється електронною системою. В якості матеріалу дефлектора доцільно використати халькогенідне скло $\text{Ge}_{2.17}\text{As}_{39.13}\text{S}_{58.70}$.

Проведені теоретичні дослідження дозволили визначити основні характеристики акустооптичного дефлектора. Для відхилення лазерного променя в межах інформаційного поля з кутом $\Delta\theta_d = 4^\circ = 0,06 \text{ рад}$ і визначених фізичних характеристиках халькогенідного скла необхідно забезпечити частоту коливань акустичної хвилі $f = 247 \text{ МГц}$. Показано, щори роздільній здатності дефлектора $N = 420$ і частоті коливань $f = 247 \text{ МГц}$ швидкодія дефлектора складатиме $\tau = 1,7 \cdot 10^{-6} \text{ с}$.

Роздільна здатність дефлектора зменшується при збільшенні довжини ультразвукової хвилі та збільшується при збільшенні діаметру лазерного променя, який має бути узгоджений з розмірами дефлектора.

Максимальне відхилення лазерного променя буде спостерігатись при його падінні на бічну поверхню дефлектора під кутом Брегга. Якщо лазер генерує випромінювання на довжині хвилі $\lambda = 0,905 \text{ мкм}$, то при визначених параметрах дефлектора кут падіння повинен складати $\theta_{\text{бр}} = 8^\circ$.

Література

- [1] С. В. Утемов, "Роль и место командных и автоматических лазерно-лучевых систем наведения ракет в зарубежных противотанковых ракетных комплексах", *Вестник Воронежского государственного технического университета*, Т. 6, №2, с. 60-68, 2010.
- [2] С. В. Утемов, "Зарубежные командные лазерно-лучевые системы телеуправления", *Вестник*

- Воронежского государственного технического университета*, Т. 7, №3, с. 97-102, 2011.
- [3] В. И. Балакшин, В. Н. Парыгин, Л. Е. Чирков. *Физические основы акустооптики*. Москва, СССР: Радио и связь, 1985.
- [4] В. В. Данилов, "Классификационный анализ акустооптических устройств управления лазерным пучком", *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, №2. с. 52-59, 2000.
- [5] В. І. Феделеш, М. М. Стегура, І. М. Юркін, П. П. Бабидорич, "Акустооптичні модулятори і дефлектори на основі халькогенідних стеклок", *Науковий вісник Ужгородського університету. Серія Фізика*, Вип. 26, с. 157-166, 2009.
- [6] Л. Н. Магдич, В. Я. Молчанов. *Акустооптические устройства и их применение*. Москва, СССР: Сов. радио, 1978.
- [7] Э. Дьелесан, Д. Руайе. *Упругие волны в твердых телах. Применение для обработки сигналов*: пер. с франц.; В. В. Леманов. Ред. Москва, СССР: Наука, 1982.
- [8] Легкий переносной ракетный комплекс «Корсар». Государственное предприятие «Государственное Киевское конструкторское бюро «Луч» [Электронный ресурс]. Доступно: www.luch.kiev.ua
- [9] «Застосування монокристала напівпровідникового твердого розчину селеніду галію-індію (Ga_{0,4}In_{0,6})₂Se₃ як матеріалу для акустооптичного модулятора лазерного випромінювання». Патент України UA 25754 U. Бюл. №2, 2007.

УДК 623.46.084.2

О. К. Кучеренко*Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина***ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ АКУСТООПТИЧЕСКОГО ДЕФЛЕКТОРА ДЛЯ ЛАЗЕРНО-ЛУЧЕВОЙ СИСТЕМЫ НАВЕДЕНИЯ РАКЕТ**

Работа посвящена разработке акустооптического дефлектора для лазерно-лучевой системы наведения (ЛЛСН) ракет. ЛЛСН используют в полуавтоматических переносных ракетных комплексах для поражения враждебных целей разного типа. Анализ способов построения подобных систем показал, что наиболее перспективны устройства с кодово-импульсной модуляцией с использованием полупроводниковых импульсных лазеров.

В статье приведена схема и описан принцип действия ЛЛСН с кодово-импульсной модуляцией. Проблемным вопросом при внедрении такой системы является разработка устройства отклонения лазерного луча, посредством которого осуществляется наведение ракеты на цель.

Сканирующие механические устройства, которые сейчас используются, имеют сложную конструкцию, значительные габариты и вес, ограниченное быстродействие. В статье предложено использовать для отклонения лазерного луча в пределах информационного поля системы наведения акустооптический дефлектор, который лишен указанных недостатков, поскольку заменяет механическое устройство сканирования на электронное.

Целью статьи является определение основных параметров акустооптического дефлектора.

В статье рассмотрен принцип действия акустооптического дефлектора. Отмечено, что особенно низкими значениями акустических потерь ($\alpha < 1 \text{ dB/cm}$) обладают стекла на основе халькогенидов германия, в частности стекло состава $\text{Ge}_{2,17}\text{As}_{39,13}\text{S}_{58,70}$. Наибольший угол отклонения лазерного луча будет наблюдаться при дифракции Брэгга. Приводятся соотношения, с помощью которых можно определить основные характеристики дефлектора: угол отклонения лазерного луча, частоту модуляции акустической волны, разрешение, быстродействие и другие.

При использовании приведенных соотношений для типовых параметров существующей системы наведения рассчитаны значения указанных характеристик.

Ключевые слова: лазерно-лучевая система наведения; акустооптический дефлектор; определение основных характеристик дефлектора.

Oleg K. Kucherenko*National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine***DETERMINATION OF THE ACOUSTO-OPTICAL DEFLECTOR PARAMETERS FOR A LASER-RADIATION ROCKET GUIDANCE SYSTEM**

The work is devoted to the development of an acousto-optic deflector for a laser-beam guidance system (LLSN) of missiles. LLSN is used in semi-automatic portable missile systems to destroy hostile targets of various types. An analysis of the methods for constructing such systems has shown that the most promising devices with pulse-code modulation using semiconductor pulsed lasers.

The article provides a diagram and describes the principle of operation of the LLSN with pulse-code modulation. A problematic issue in the implementation of such a system is the development of a device for deflecting a laser beam,

through which the missile is guided to a target. Scanning mechanical devices that are currently in use have a complex design, significant dimensions and weight, and limited performance.

The article proposes to use an acousto-optic deflector to deflect the laser beam within the information field of the guidance system, which is devoid of these disadvantages, since it replaces the mechanical scanning device with an electronic one. The purpose of the article is to determine the main parameters of the acousto-optical deflector.

The article discusses the principle of operation of an acousto-optic deflector. It is noted that glasses based on germanium chalcogenides, in particular, glass with the composition $\text{Ge}_{2.17}\text{As}_{39.13}\text{S}_{58.70}$, have especially low values of acoustic losses ($\alpha < 1 \text{ dB / cm}$).

The largest deflection angle of the laser beam will be observed with Bragg diffraction. Relationships are given that can be used to determine the main characteristics of the deflector: the angle of deflection of the laser beam, the modulation frequency of the acoustic wave, resolution, speed, and others. When using the above ratios for the typical parameters of the existing guidance system, the values of the indicated characteristics are calculated.

Keywords: laser-beam guidance system; acousto-optic deflector; determination of the main characteristics of the deflector.

*Надійшла до редакції
13 жовтня 2021 року*

*Рецензовано
18 листопада 2021 року*