

АНАЛІЗ ЗАСТОСУВАННЯ ЛАЗЕРІВ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ КООРДИНАТ ШТУЧНИХ НЕБЕСНИХ ТІЛ

Ю. С. Денищик, В. С. Ессельбах
Державний міжвузівський центр "Оріон",
вул. Набережна, 12, м. Алчевськ, Луганська обл., 94204, Україна
(Отримано 9 жовтня 2002 р.)

З позицій теорії оптимізації розглянуто ефективність застосування різноманітних лазерів для вимірювання координат штучних небесних тіл. Запропоновано цільові функції, які дозволяють отримати порівняльні числові оцінки зазначеної ефективності. При цьому взято до уваги особливості кожного варіанта побудови лазерної локаційної станції.

Ключові слова: лазери, локація, супутники, вимірювання, координати.

PACS number(s): 93.85.+q

У лазерних локаційних станціях (ЛЛС) для вимірювання координат штучних небесних тіл (ШНТ) у ролі передавачів застосовують різноманітні лазери. Вони визначають можливості станції більшою мірою, ніж передавачі радіолокаційних станцій у радіодіапазоні. Це пояснюється переважним використанням у приймальних пристроях ЛЛС прямого фотодетектування, яке не зберігає фази несучого коливання оптичного сигналу. Тому доцільно розглянути порівняльну ефективність застосування в ЛЛС різних лазерів з використанням методів теорії оптимізації, які дають числову оцінку ефективності кожного варіанта побудови всієї системи.

Далекодія ЛЛС з багатофотонними приймачами пов'язана з імпульсною потужністю лазера P_t локаційним рівнянням [1]:

$$P_t = \frac{4\pi R^4 P_r \theta_t^2}{A_e \sigma S_t S_r}, \quad (1)$$

де R — відстань до об'єкта вимірювання; P_r — порогова потужність сигналу; θ_t — кутова ширина променя передавального телескопа; A_e — площа апертури приймального телескопа; σ — ефективна площа розсіювання (ЕПР) об'єкта випромінювання; S_t — коефіцієнт пропускання атмосфери; S_r — коефіцієнт пропускання оптичних елементів ЛЛС.

Крім далекодії ЛЛС, важливою характеристикою є похибка вимірювання відстаності. Сюди ж можна віднести частоту повторення зондуючих імпульсів F_{zi} , яку необхідно брати до уваги в режимі накопичення післядетекторних сигналів при локації нерухомих об'єктів, наприклад, геостационарних супутників. Тоді можна говорити про середню потужність передавача $P_c = P_t \tau_{zi} F_{zi}$, де τ_{zi} — тривалість зондуючого імпульсу. Враховуючи завдання, які розв'язують ЛЛС у супутниковій геодезії й космічній навігації, оберемо для умовної станції два показники якості: граничну далекодію R_{\max} і похибку вимірювання відстаності ΔR [2].

Для першого показника якості цільова функція може бути записана, відповідно до локаційних рів-

нянь (1), так:

$$R_{\max} = \sqrt[4]{\frac{P_{t \max} A_e \sigma S_t S_r}{4\pi P_r \theta_t^2}}. \quad (2)$$

Для формули (2) P_r визначаємо співвідношенням [1]

$$P_r = (N_s h\nu) / (\eta \tau_S), \quad (3)$$

де N_s — потрібна мінімальна кількість сигнальних фотоелектронів на виході фотодетектора, достатня для роботи решти частини приймального пристрою, тобто енергетичний поріг; h — постійна Планка; ν — частота оптичного сигналу; η — квантова ефективність фотодетектора; τ_S — інтервал спостереження сигналу.

Якщо прийняти $\tau_S = \tau_{zi}$ на основі того, що сигнальні фотони можуть поступати на фотодетектор тільки протягом існування зондуючого імпульсу, то P_r — це порогова потужність оптичного сигналу під час прийому зондуючого імпульсу, відбитого від об'єкта, що пройшов через атмосферу й оптику, а $P_r \tau_{zi} = N_s h\nu / \eta$ — порогова енергія цього оптичного сигналу.

Об'єднавши вирази (2) і (3), отримаємо:

$$R_{\max} = \sqrt[4]{\frac{P_{t \max} \tau_{zi}}{N_s h\nu / \eta} \cdot \frac{A_e \sigma S_t S_r}{4\pi \theta_t^2}}. \quad (4)$$

Для однієї й тієї ж ЛЛС з різними лазерами $A_e = \text{const}$, і S_r мало змінюється в діапазоні довжин хвиль, що використовується. За тією ж умовою і для незмінного об'єкта вимірювання можна прийняти, що σ і θ_t залежать тільки від λ . Тоді отримаємо для першого показника якості для об'єкта з кутиковими відбивачами такий вираз:

$$R_{\max \text{ КВТ}} = K_1 K_2 K_3 \sqrt[4]{\frac{P_{t \max} \tau_{zi}}{N_s} \cdot \frac{S_t \eta}{\lambda^3}}, \quad (5)$$

де K_1, K_2 , — постійні коефіцієнти, що належать до σ і Θ_t , $K_3 = h^{-1/4}$, λ — довжина хвилі.

Виконані вище перетворення спрямовані на коректне спрощення цільової функції (2) для першого показника якості. Такий же підхід доцільно застосувати і щодо другого показника якості — похибки вимірювання далькості ΔR .

Прийmemo, що ЛЛС працює вночі з амплітудною дискримінацією одноелектронних імпульсів і зі стробуванням фотоприймального тракту за попередньо обчисленою далькістю, що ймовірність надходження шумових імпульсів у підінтервалі спостереження Δt , який визначається тривалістю стробування імпульсу (часових воріт), знехтувально мала. Середня кількість одноелектронних імпульсів шуму $\bar{N}_{ш} \rightarrow 0$ у вказаному підінтервалі спостереження, а середньоквадратична похибка вимірів далькості може бути відображена такою формулою [3]:

$$\Delta R = K_{ад} \frac{\tau_{зі}}{\sqrt{\bar{N}_c}}, \quad (6)$$

де $K_{ад} \approx 0.5 \cdot c$; c — швидкість світла; \bar{N}_c — середня кількість сигнальних фотонів.

Відповідно до методів теорії оптимізації [2] виберімо показник у вигляді дроби $R_{max}/(\Delta R/R_{max})$, прямо пропорційного R_{max} і зворотно пропорційного відносній похибці вимірювання далькості $\Delta R/R_{max}$. При цьому припустимо, що об'єкт вимірювання знаходиться на відстані R_{max} .

$$F = \frac{R_{max}}{\Delta R/R_{max}} = K \sqrt{\frac{P_{tmax}}{\tau_{зі}} \cdot \frac{S_t \eta}{\lambda^3}}, \quad (7)$$

де $K = (K_1, K_2, K_3)^2 / K_{ад}$, $N_s = \bar{N}_c$.

Вираз (7) отриманий при умові $N_s = \bar{N}_c$. Це означає, що від об'єкта надходить певна кількість фотонів, якій відповідає кількість N_s фотоелектронів, достатня (і не більше) для функціонування приймача. Таким чином, виконується наведена вище умова про перебування об'єкта на відстані R_{max} . У цьому випадку показник F інваріантний щодо параметрів приймальних пристроїв, що й потрібно було отримати відповідно до поставлених завдань про аналіз застосування тільки лазерів як передавальних пристроїв ЛЛС.

Підсумковий показник якості F , отриманий шляхом уведення умови $N_s = \bar{N}_c$, не має випадкових величин, тому цільова функція (7) відображає точність вимірювання далькості в значенні похибки одиночного вимірювання. Показник якості ΔR , який є складовою частиною F , містив \bar{N}_c , що передбачало усереднення випадкових значень N_c за n послань зондування імпульсу. Тоді визначення похибки вимірювання далькості за n послань зондування імпульсу підкоряється правилу обчислення дисперсії випадкової величини, і ця похибка менша в \sqrt{n} раз порівняно з похибкою одиночного вимірювання. Аналогічний висновок є в роботі [4], присвяченій харак-

теристикам точності реальних ЛЛС. Застосування виразу (7) можна розширити для багатократного опромінення нерухомого об'єкта з урахуванням згаданого зменшення похибки вимірювання далькості й отримати таку цільову функцію:

$$F' = F \sqrt{n}, \quad (8)$$

де n — кількість послань зондування імпульсу під час одного вимірювання далькості малорухомого об'єкта.

Як видно з формули (7), ліпшими будуть ЛЛС, які мають максимальну імпульсну потужність при решті однакових (близьких) параметрів, або мінімальну тривалість зондування імпульсу передавача при цій же умові. У першому випадку забезпечується максимальна далькість станції, у другому — максимальна точність вимірювання далькості. Декілька систем можуть бути розміщені в ряд за зростанням або зменшенням будь-якої цільової функції (7) або (8). Кількість послань зондування імпульсу n може бути замінена частотою проходження, тобто їх кількістю на одну і ту ж одиницю часу. При цьому різниця в n більше ніж у 100 разів, уже не впливає на точність вимірювання далькості, оскільки отримати похибку в 10 разів меншу, ніж похибка одиночного вимірювання в системах, які розглядаються, практично неможливо [4].

Якщо $n = 1$, то режим однократний при вимірюванні далькості в окремих точках орбіти ШНТ відповідно до його переміщення. У цьому випадку за частотою проходження імпульсів випромінювання всі лазери ставляться в однакові умови.

За формулами (7) і (8) були розраховані і зведені в таблицю 1 значення найважливіших для практики показників якості F при $n = 1$ і F' при $n \neq 1$ для умовних ЛЛС з лазерами, які використовували у Кримській науковій станції ФІАН для локації Місяця і ШНТ, і з сучаснішими лазерами виробництва підприємства "Ексма". Значення коефіцієнта K приймали рівним одиниці, оскільки множник постійний для цього показника, розмірності пропущені, що відповідає правилам теорії оптимізації [2]. Значення квантової ефективності фотодетектора для довжин хвиль 0.53; 0.7; 1.1 мкм приймали відповідно рівними 0.3; 0.23; 0.04. Це параметри одного з найдосконаліших фотодетекторів — квантокона фірми Varian LSE з довжиною одноелектронного імпульсу меншою за 1 нс. Вводили відповідні коефіцієнти пропускання атмосфери [5,6].

З таблиці 1 видно, що в однократному режимі ЛЛС з лазерами на рубіні мають перевагу над ЛЛС з лазерами на ґранаті з модуляцією добротності. При $n \neq 1$ вони близькі за ефективністю для довжин хвиль випромінювання $\lambda = 0.53$ за рахунок близьких середніх потужностей. При переході до сучасніших лазерів на ґранаті з модуляцією добротності і зі скороченими імпульсами випромінювання перевага лазерів на рубіні повністю втрачається. Чим коротші імпульси випромінювання лазерів на ґранаті

при близьких енергіях, тим вища ефективність їх використання. У цьому випадку відбувається одночасне

збільшення граничної далекодії ЛЛС і точності вимірювання далькості.

Тип лазера	Довжина хвилі випромінювання, мкм	Імпульсна потужність, МВт	Довжина імпульсу випромінювання, нс	Частота руху імпульсів випромінювання, Гц	F ($n = 1$)	F' ($n \neq 1$)
КНС ФІАН, лазер на рубіні	0.694	1.3×10^3	2.0	0.33	14.7	8.41
КНС ФІАН, лазер на YAG:Nd	0.532	33.3	3.0	10.0	3.14	9.92
КНС ФІАН, лазер на YAG:Nd (взятий для порівняння)	1.064	100	3.0	10.0	0.95	3.0
ЕКСМА, лазер на YAG:Nd	0.532	286	0.35	5.0	26.9	60.2
ЕКСМА, лазер на YAG:Nd	0.532	770	0.13	5.0	72.5	162

Таблиця 1. Значення показника якості F при $n = 1$ і F' при $n \neq 1$.

[1] *Справочник по радиолокации*, под ред. М. Сколника (Советское радио, Москва, 1978).
 [2] Л. С. Гуткин, *Оптимизация радиоэлектронных устройств по совокупности показателей качества* (Советское радио, Москва, 1975).
 [3] А. С. Батраков, М. М. Бутусов, Г. П. Гречка и

др. *Лазерные измерительные системы*, под ред. Д. П. Лукьянова (Радио и связь, Москва, 1981).
 [4] К. Гамал, *Квант. электрон.* **5**, 2428 (1978).
 [5] *Справочник по лазерам* (Советское радио, Москва, 1978).
 [6] Г. Г. Угнер, *Оптическая связь* (Связь, Москва, 1979).

LASERS EFFICIENCY FOR TAKING COORDINATES OF ARTIFICIAL CELESTIAL BODIES AND SATELLITE GEODESY

Yu. Denishchik, V. Esselbakh
 State Institute Center "Orion",
 12 Naberezna Str., Alchevsk, Luganska obl., UA-94204, Ukraine
 e-mail: orion@dmmi.edu.ua

Within optimization theory the lasers efficiency for taking coordinates of artificial celestial bodies was examined. Special functions allowing for a comparative quantitative estimations of the said efficiency taking into account construction peculiarities for each laser locating station were proposed.