

ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОЦІНКА ТОЧНОСТІ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ СИСТЕМИ ВИМІРЮВАННЯ ВІДСТАНІ ФАЗОВОГО ТИПУ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі проведено математичне та імітаційне моделювання вимірювального тракту фазового лазерного далекоміра в середовищі MATLAB. Розглянуто структурну схему системи на базі генератора Si5351A та мікроконтролера STM32F030C8T6 з інтегрованим лавинним фотодіодом. Обґрунтовано використання першої гармоніки для фазового аналізу та застосування гетеродинного перетворення для перенесення високочастотного сигналу в область низьких частот. Проаналізовано вплив частоти модуляції, відношення сигнал/шум та відбивної здатності поверхонь на точність вимірювання. Верифіковано двочастотний метод усунення неоднозначності, що забезпечує стійку роботу в діапазоні до 60 м. Сформовано інтегральний бюджет похибок, згідно з яким сумарне середньоквадратичне відхилення системи становить 0,95 мм.

Ключові слова: азовий лазерний далекомір, імітаційне моделювання, MATLAB, гетеродинне перетворення, відношення сигнал/шум, бюджет похибок.

Simulation Modeling and Accuracy Estimation of a Phase-Shift Optoelectronic Distance Measurement System

Abstract

This paper presents the mathematical and simulation modeling of the measurement channel of a phase-shift laser rangefinder using MATLAB. The structural design of the system based on the Si5351A clock generator, STM32F030C8T6 microcontroller, and an integrated avalanche photodiode is considered. The application of the first harmonic for phase analysis and the use of heterodyne conversion for shifting the high-frequency signal to the low-frequency domain are theoretically justified. The impact of modulation frequency, signal-to-noise ratio (SNR), and surface reflectance on measurement accuracy is analyzed. A two-frequency ambiguity resolution method is verified, ensuring stable operation within a range of up to 60 m. An integrated error budget is formulated, showing that the total root-mean-square (RMS) error of the system is 0.95 mm.

Keywords: phase-shift laser rangefinder, simulation modeling, MATLAB, heterodyne conversion, signal-to-noise ratio, error budget.

Вступ

Прецизійне визначення лінійних розмірів та відстаней є однією з ключових задач сучасної оптико-електронної інструментальної техніки, робототехніки та систем промислової автоматизації. Серед безконтактних методів лазерного далекоміру фазовий метод посідає чільне місце, забезпечуючи оптимальний баланс між високою роздільною здатністю (міліметровий рівень похибки), максимальною технологічною дальністю та помірною складністю апаратно-схемотехнічної реалізації пристроїв [1, 2]. На відміну від класичного імпульсного методу, фазовий підхід не потребує прямого швидкісного хронометрування надмалих часових інтервалів поширення світла, а зводить вимірювальну задачу до оцінювання фазового зсуву гармонічних або періодичних сигналів, що відкриває широкі можливості для його мікроконтролерної інтеграції.

Метою роботи є імітаційне математичне моделювання вимірювального тракту фазової оптико-електронної системи в середовищі MATLAB для кількісного оцінювання впливу частоти модуляції, шумів, відбивної здатності досліджуваних поверхонь та цифрового усереднення на сумарну похибку вимірювання відстані.

Принцип функціонування та структурна схема системи

В основі функціонування розробленої системи лежить визначення просторової відстані L до об'єкта за фазовим зсувом $\Delta\varphi$ між опорним модулюючим сигналом та інформаційним сигналом, отриманим фотоприймальним трактом після відбиття оптичного випромінювання від поверхні зондування.

Для реалізації цього принципу запропоновано структуру, що узагальнює два базові канали:

1) передавальний канал: містить генератор модулюючого сигналу, драйвер лазера, лазерний випромінювач та передавальну оптику. Він відповідає за формування спрямованого пучка з амплітудною модуляцією інтенсивності;

2) приймально-обчислювальний канал: складається з приймальної оптики, високочутливого лавинного фотодіода (ЛФД) із керованим мікроконтролером вузлом високовольтного зворотного зміщення, трансїмпедансного підсилювача, селективного підсилювача (фільтра), блоку визначення фазового зсуву та обчислювального ядра (на базі мікроконтролера STM32F030C8T6 [3]).

Важливою архітектурною особливістю є введення до системи подвійної оптичної гілки: зовнішнього вимірювального тракту та внутрішнього еталонного каналу з фіксованою геометричною довжиною. Внутрішній канал дозволяє автоматично вимірювати та програмно віднімати власну апаратуру затримку електронно-оптичного тракту:

$$\Delta\varphi_{\text{кор}} = \Delta\varphi_{\text{зовн}} - \Delta\varphi_{\text{вн}} \quad (1)$$

Така компенсація суттєво мінімізує вплив температурного дрейфу компонентів, часової нестабільності аналогових вузлів та індивідуального розкиду параметрів елементів.

Узагальнена структурна схема системи наведена на рис. 1.

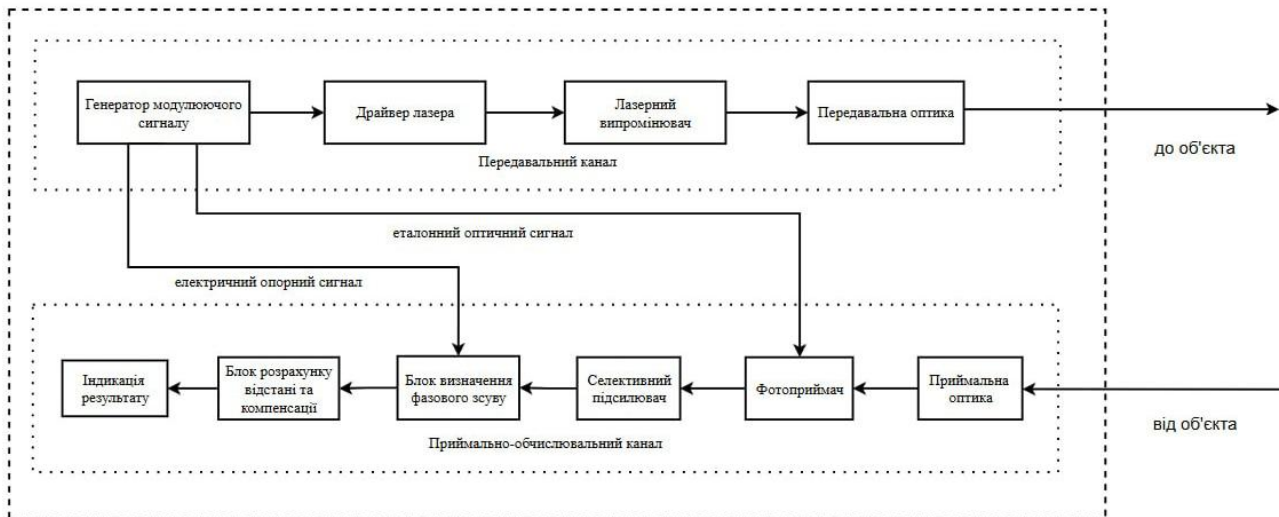


Рисунок 1 – Запропонована структурна схема оптико-електронної системи вимірювання відстані фазового типу

Математична модель вимірювального тракту

Для формування математичного опису процесів у середовищі MATLAB [4] реальний прямокутний CMOS-сумісний сигнал цифрового генератора Si5351A розглядається за його першою гармонікою [5]. Це є теоретично обґрунтованим, оскільки вищі гармонічні складові ефективно пригнічуються селективними фільтрами приймального тракту. Опорний сигнал першої гармоніки описується як:

$$s_1(t) = A_1 \cdot \sin(2\pi f_m t), \quad (2)$$

де A_1 – амплітуда опорного сигналу; f_m – частота модуляції; t – час.

Прийнятий інформаційний сигнал набуває часової затримки та супроводжується адитивним шумом:

$$s_2(t) = A_2 \cdot \sin(2\pi f_m t - \Delta\varphi) + n(t), \quad (3)$$

де A_2 – амплітуда прийнятого сигналу, що враховує втрати в оптичному тракту та відбивну здатність поверхні; $\Delta\varphi$ – фазовий зсув; $n(t)$ – шумова складова приймального тракту.

Зв'язок між геометричною відстанню L та фазовим зсувом $\Delta\varphi$ описується класичними виразами:

$$\Delta\varphi = 4\pi f_m L / c, \quad (4)$$

де L – відстань до об'єкта; c – швидкість світла ($3 \cdot 10^8$ м/с). Відстань розраховується за зворотною залежністю.

Для оцифрування високочастотного сигналу (5–10 МГц) безпосередньо за допомогою інтегрованого АЦП мікроконтролера в моделі реалізовано алгоритм гетеродинного перетворення. Генератор Si5351A формує два сигнали, зсунуті за частотою так, що їх змішування утворює низьку проміжну частоту (наприклад, 5 кГц при основній частоті 5,000 МГц та локальній 5,005 МГц). Це дає змогу перенести високочастотну фазову інформацію в низькочастотну область без її спотворення чи втрати.

Для імітації фазового шуму застосовано статистичну модель [6], де середньоквадратичне відхилення (СКВ) похибки оцінювання фази σ_φ залежить від лінійного відношення сигнал/шум (SNR) та кількості дискретних відліків у аналітичному вікні N_S :

$$\sigma_\varphi = \sqrt{\frac{2}{N_S \cdot SNR}}. \quad (5)$$

Результати імітаційного моделювання та їх аналіз

Первинна верифікація моделі за умов відсутності шумових завад показала нульову абсолютну похибку розрахунку відстані (на рівні машинної точності), що підтверджує коректність програмної реалізації базових аналітичних виразів. Дослідження впливу частоти модуляції виявило фундаментальний метрологічний компроміс: із підвищенням частоти f_m від 5 МГц до 10 МГц чутливість системи зростає, а СКВ похибки відстані лінійно зменшується рівно вдвічі (табл. 1). Проте одночасно з цим максимальний діапазон однозначного вимірювання (межа 360°) скорочується з 30 м до 15 м.

Таблиця 1. Вплив частоти модуляції на СКВ похибки вимірювання (із врахуванням логарифмічного загасання сигналів)

Відстань L , м	SNR, дБ	СКВ (5 МГц), мм	СКВ (10 МГц), мм	Зменшення СКВ, %
1	45	2,37	1,19	50,0
5	31	11,87	5,93	50,0
10	25	23,73	11,87	50,0
15	21,5	35,6	17,8	50,0

Для подолання обмеження однозначного діапазону при забезпеченні високої точності було промодельовано багаточастотний режим роботи [7]. Синтезовано алгоритм, у якому низька частота (2,5 МГц) формує грубу оцінку відстані в розширеному просторовому вікні до 60 метрів, визначаючи цілу кількість (N) повних фазових циклів високочастотного вимірювання. Після цього вища частота (10 МГц) забезпечує прецизійне фінальне обчислення відстані. Математичний експеримент підтвердив стійкість алгоритму: у всьому діапазоні до 60 метрів абсолютна похибка визначення остаточної відстані не перевищила 0,4 мм.

Результати дослідження впливу енергетичних параметрів тракту – співвідношення сигнал/шум (SNR) та інтегрального коефіцієнта відбивної здатності поверхонь ρ наведено у таблиці 2.

Таблиця 2. Залежність СКВ похибки від SNR та коефіцієнта відбиття поверхні ρ ($f_m = 5$ МГц)

SNR, дБ	СКВ від SNR, мм	Коефіцієнт відбиття ρ	Розрахункове SNR, дБ	СКВ від ρ , мм
10	133,46	0,9	40	4,22
20	42,2	0,7	37,8	5,43
30	13,35	0,5	34,9	7,6
40	4,22	0,3	30,5	12,66
50	1,33	0,1	20,9	37,98

Аналіз даних свідчить про те, що зниження відбивної здатності (перехід до темних чи шорстких поверхонь із $\rho = 0,1$) викликає погіршення відношення сигнал/шум, що призводить до стрімкого зростання випадкової похибки з 4,22 мм до майже 38 мм. Це обґрунтовує необхідність апаратного підвищення динамічного діапазону ЛФД та впровадження усереднення серії вимірювань.

Для комплексної оцінки точності розробленої системи сформовано сумарний бюджет похибок для реперної точки: відстань 10 м, робоча частота 10 МГц, початкове $SNR = 40$ дБ та кількість цифрових усереднень $N = 16$. За умови незалежності джерел завад сумарне значення розраховано за середньоквадратичним принципом.

Результати моделювання:

- шум приймального тракту (після усереднення $N = 16$): 0,53 мм;
- апаратно-температурна нестабільність опорного кварцового генератора (25 ppm): 0,25 мм;
- похибка квантування вбудованого АЦП та цифрової обробки: 0,25 мм.
- залишковий некомпенсований температурний дрейф елементів: 0,30 мм;
- інтегральна нелінійність характеристик драйвера і приймача: 0,40 мм;
- залишкова дискретна похибка калібрувальної процедури: 0,50 мм;
- сумарна СКВ системи: близько 0,95 мм.

Імітаційне моделювання процесу накопичення даних підтвердило, що збільшення кількості усереднень вимірів N ефективно знижує випадкову складову за стохастичним законом $1/\sqrt{N}$. Проте при $N > 16$ темп покращення точності суттєво уповільнюється, оскільки на сумарний поріг починають впливати невідповідні (систематичні) апаратні складові: нелінійність, дрейф та якість первинного калібрування тракту.

Висновки

У роботі створено комплексну імітаційну математичну модель фазового лазерного далекоміра в середовищі MATLAB, яка адекватно враховує фізичні процеси гетеродинного перенесення частоти, шуми та наявність внутрішнього оптичного еталона.

Теоретично та експериментально доведено ефективність використання першої гармоніки для аналізу фазових характеристик періодичних цифрових сигналів генератора Si5351A.

Кількісно оцінено компроміс між робочою частотою модуляції та межею однозначності. Запропоновано та верифіковано алгоритм двочастотного усунення неоднозначності, який забезпечує стійку роботу системи в розширеному діапазоні до 60 метрів із субміліметровою точністю.

Розрахований інтегральний бюджет похибок свідчить, що за умов $SNR = 40$ дБ на частоті 10 МГц та при усередненні 16 незалежних вимірювань сумарне СКВ похибки становить 0,95 мм, що задовольняє сучасні метрологічні вимоги до лазерних вимірювальних систем. Розроблена модель є надійною базою для проектування та оптимізації фізичних прототипів далекомірної техніки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Amann M.-C., Bosch T., Lescure M., Myllylä R., Rioux M. Laser ranging: A critical review of usual techniques for distance measurement. *Optical Engineering*. 2001. Vol. 40, No. 1. 10 p. DOI: 10.1117/1.1330700.

2. Mohammad Nejad S., Olyae S. Comparison of TOF, FMCW and Phase-Shift Laser Range-Finding Methods by Simulation and Measurement. *Quarterly Journal of Technology & Education*. 2006. Vol. 1, Special issue. 8 p.
3. STMicroelectronics. STM32F030x4/x6/x8/xC: Mainstream Arm Cortex-M0 Access Line MCU. Datasheet. Geneva : STMicroelectronics, 2021. 93 p.
4. Attia J. O. Electronics and Circuit Analysis Using MATLAB. 2nd ed. Boca Raton : CRC Press, 2004. 412 p.
5. Silicon Laboratories. Si5351A/B/C-B I2C-Programmable Any-Frequency CMOS Clock Generator + VCXO. Datasheet. Austin : Silicon Laboratories, 2015. 41 p.
6. Gu Z., Lai J., Wang C., Yan W., Ji Y., Li Z. Theoretical range precision obtained by maximum likelihood estimation in laser radar compared with the Cramer-Rao bound. *Applied Optics*. 2018. Vol. 57, No. 34. 7 p. DOI: 10.1364/AO.57.009951.
7. Zhou L., He H., Sun J., Lin B. Phase-Shift Laser Ranging Technology Based on Multi-Frequency Carrier Phase Modulation. *Photonics*. 2022. Vol. 9, No. 9. 11 p. DOI: 10.3390/photonics9090603.

Мазорчук Дмитро Вікторович – студент гр КОІС-22б, кафедра біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, email: mazorchuk421@gmail.com

Науковий керівник – Карась Олександр Володимирович, д-р філософії, доцент, кафедра біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, email: karas@vntu.edu.ua

Mazorchuk Dmytro V. –student of gr KOIS-22b, department of biomedical engineering and optical-electronic systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia. email: mazorchuk421@gmail.com

Scientific supervisor – Karas Oleksandr V., Ph. D., Associate Professor, department of biomedical engineering and optical-electronic systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia. email: karas@vntu.edu.ua