

К. т. н. А. В. САДЧЕНКО, О. А. КУШНІРЕНКО, Є. К. КОШЕЛЄВ

Україна, Одеський національний політехнічний університет

E-mail: koa@onu.ua

## ЗАВАДОСТІЙКА СИСТЕМА ІМПУЛЬСНОЇ ЛАЗЕРНОЇ ДАЛЬНОМЕТРІЇ

Запропоновано структурну схему імпульсного лазерного далекоміра з можливістю виявлення імпульсних завод, які діють в межах його дальності, та виправлення помилок, що виникають в структурі відбитого від цілі сигналу. Основою схеми далекоміра є логічний узгоджений фільтр, який реалізує операцію логічної згортки і структура якого не містить помножувачі. На основі вимог до кодуєчих послідовностей були знайдені оптимальні структури бінарних зондуєчих сигналів довжиною 8, що забезпечують найкращу коректуючу здатність. Також виконано порівняння кореляційних властивостей знайдених послідовностей та послідовностей, побудованих за допомогою функції Уолша.

**Ключові слова:** лазерна дальнометрія, логічна згортка, функції Уолша, бінарні послідовності, логічний узгоджений фільтр.

Застосування імпульсних лазерних далекомірів на відстанях кілька десятків кілометрів має велику економічну і практичну доцільність завдяки їхній компактності, мобільності та енергоефективності [1].

На **рис. 1** наведено узагальнену схему імпульсного лазерного далекоміра та епюри сигналів в контрольних точках. Принцип його дії ідентичний дії імпульсного локатора. Генератор зондуєчого сигналу з деяким періодом повторення  $T_{\Pi}$  виробляє короткий відеоімпульс. Тривалість імпульсу забезпечує необхідну роздільну здатність по дальності, а період повторення вибирається виходячи з максимальної дальності. Після посилення сигналу відбувається амплітудна маніпуляція лазерного випромінюван-

ня. Зондувальний імпульс (позначений на схемі як «Start») своїм заднім фронтом запускає лічильник відміток дальності. Відмітки дальності формуються генератором вузьких стробів  $T_C$  — два імпульси на тривалості зондуєчого сигналу. Лічильник відміток дальності зупиняється переднім фронтом сигналу з оптичного приймача, пропущеного через компаратор. Якщо відбитий сигнал відсутній, дані лічильника скидаються автоматично. Підрахована кількість відміток дальності ( $N_D$ ) перекладається в значення дальності і відображається на індикаторі.

Слід зазначити, що за наявності імпульсних завод, які впливають на вхід оптичного приймача як в період зондування, так і в момент прийняття від-

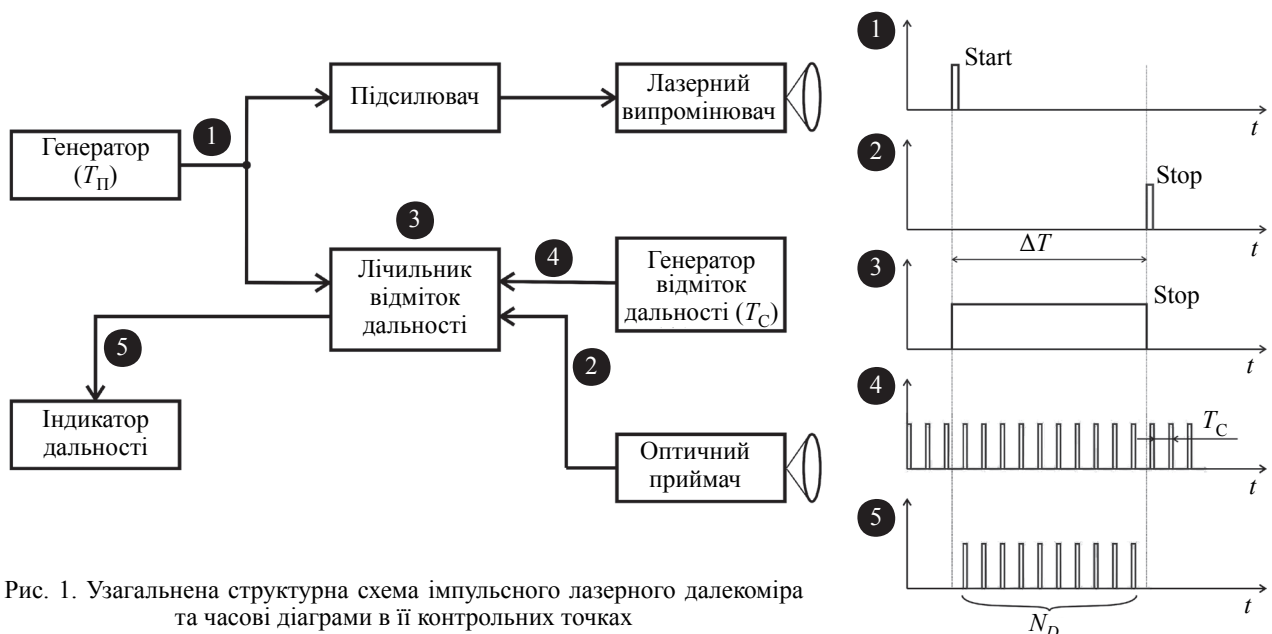


Рис. 1. Узагальнена структурна схема імпульсного лазерного далекоміра та часові діаграми в її контрольних точках

битого сигналу, достовірність вимірювань знижується. Одним із способів боротьби з даною проблемою є багаторазовий повтор вимірювань відстані з усередненням результатів [2—5], однак він не підходить у тих випадках, коли необхідно вимірювати відстань до рухомого об'єкта або контролювати його швидкість, крім того, даний метод не гарантує збіжність результатів вимірювання.

В [6] запропоновано алгоритм вимірювання фазових зсувів у фазових лазерних далекомірних системах, який дозволяє без застосування автоматичного калібрування істотно зменшити випадкову похибку вимірювання, яка обумовлена дією флікер-шуму. При цьому вплив широкосмугових завад зменшується за рахунок усереднення багаторазових вибірок значень синусоїдальної і косинусоїдальної складових сигналу, що використовуються для оцінки фазового зсуву, пропорційного вимірюваній відстані. Однак запропонований алгоритм не гарантує достовірність результатів вимірювань в умовах імпульсних завад.

В [7] завадостійкість імпульсного лазерного далекоміра на тлі пасивних завад забезпечується завдяки адаптивному керуванню потужністю та тривалістю випромінюваних імпульсів, а також шириною смуги пропускання приймального тракту. При цьо-

му даний підхід не дозволяє виявляти та забезпечувати коректну роботу пристрою в умовах активних імпульсних завад.

В даній роботі розроблено структурну схему імпульсного лазерного далекоміра, що забезпечує високу достовірність результатів вимірювання відстані до рухомої цілі в умовах імпульсних завад.

Дослідження проводилися в хмарному сервісі середовища математичного моделювання MATLAB.

У дослідженнях зроблено припущення, що імпульсні завади впливають на оптичний приймач і мають енергію, порівнянну з енергією зондуємого сигналу, отже, мають і порівнянну тривалість, при цьому роблять неможливим коректне вимірювання відстані. Джерелами завад можуть бути як випромінювання аналогічних далекомірів в тому ж діапазоні частот, так і навмисно створені завади.

Основні типи імпульсних завад наведено на **рис. 2**. Зазначимо, що тут і далі проводилось моделювання залежностей рівня напруги від нормованого (до тривалості одного елемента сигналу  $\tau_{puls}$ ) часу  $Nt/\tau_{puls}$ .

Підвищити достовірність результатів вимірювань можна завдяки виявленню завад та виправленню похибки у відбитому від цілі сигналі. При цьому одночасно виявити імпульсні завади та виправити по-

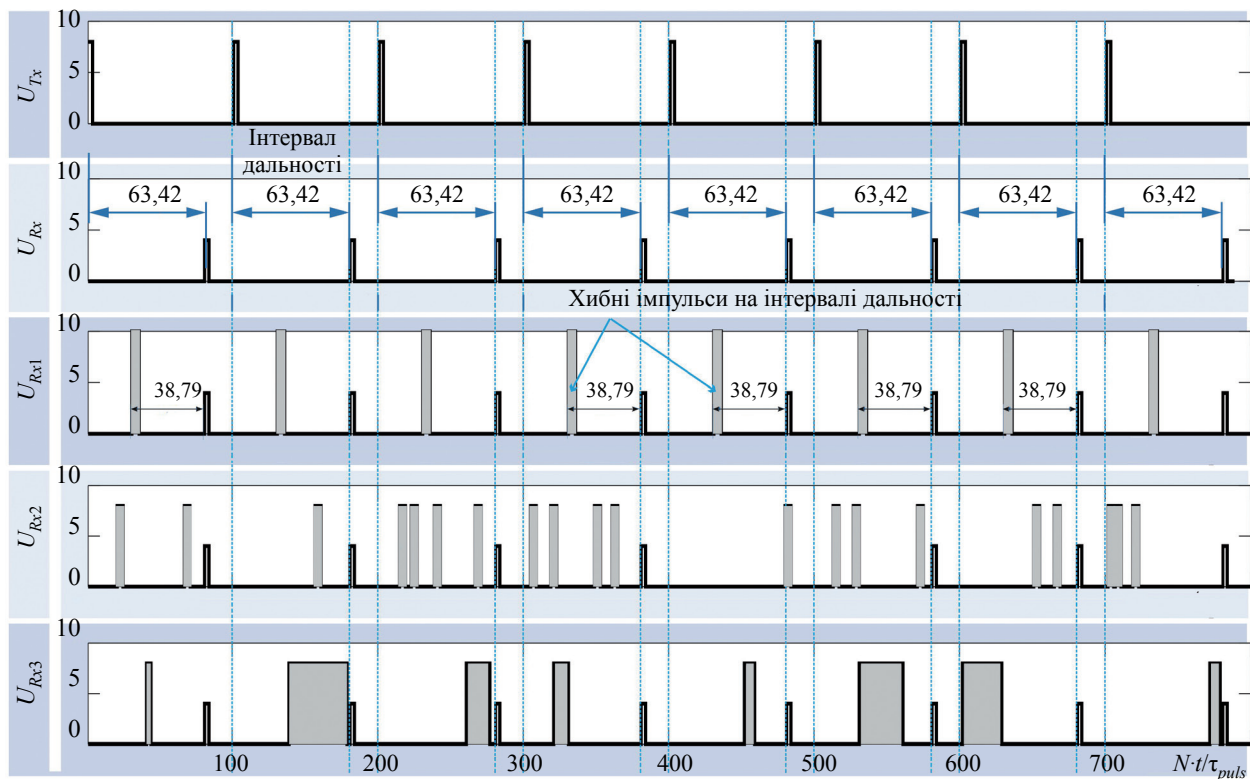


Рис. 2. Залежності рівня напруги сигналу від нормованого часу (зверху вниз):

$U_{Tx}$  — випромінюваний сигнал;  $U_{Rx}$  — прийнятий сигнал;  
 $U_{Rx1}$  — періодична послідовність імпульсів «помилкова відстань»;  
 $U_{Rx2}$  — хаотична послідовність імпульсів;  $U_{Rx3}$  — ШІМ-послідовність

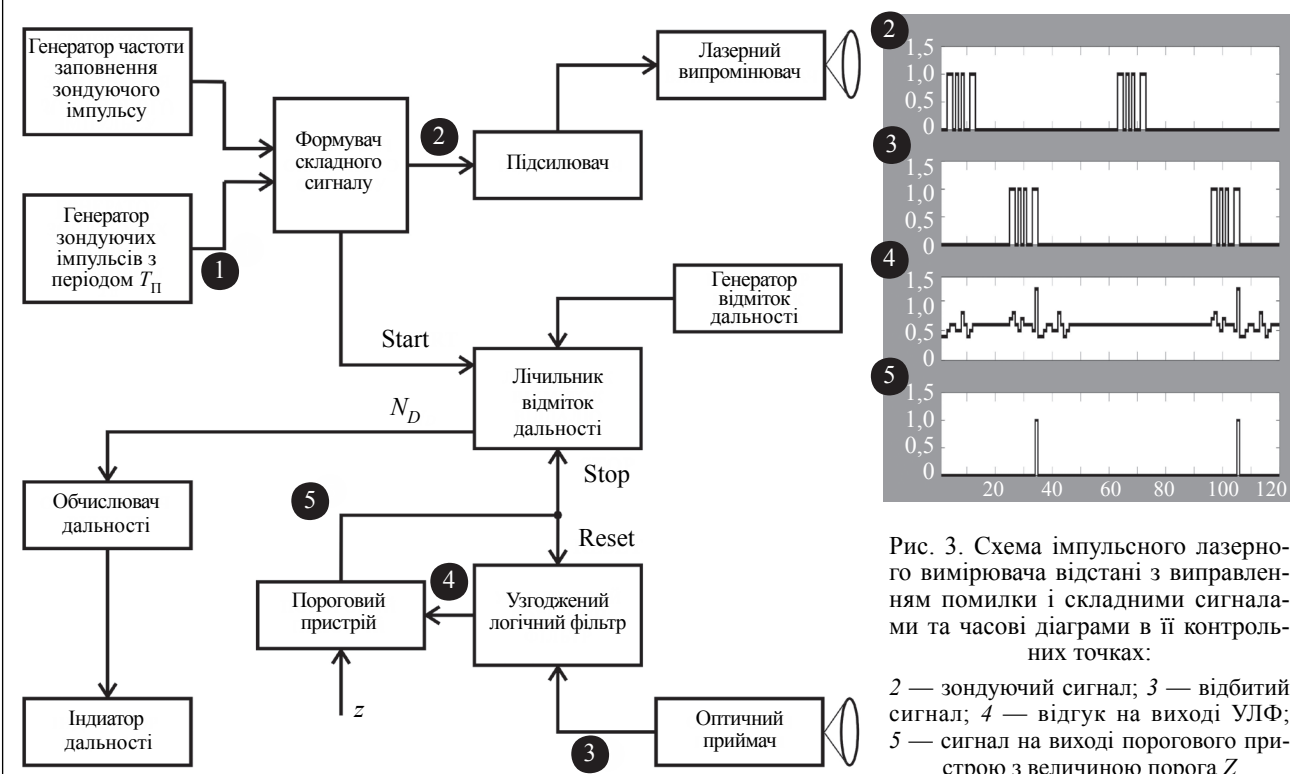


Рис. 3. Схема імпульсного лазерного вимірювача відстані з виправленням помилок і складними сигналами та часові діаграми в її контрольних точках:  
 2 — зонduючий сигнал; 3 — відбитий сигнал; 4 — відгук на виході УЛФ; 5 — сигнал на виході порогового пристрою з величиною порога  $Z$

хибки можна тільки за допомогою складних зонduючих сигналів.

Розглянемо наведену на **рис. 3** схему лазерного далекоміра з використанням складних сигналів.

У передавальній частині вона містить формувач бінарного складного сигналу, а в приймальній — узгоджений з ним фільтр. Як тільки відгук автокореляційної функції на виході узгодженого фільтра перевищить граничне значення, лічильник відміток дальності зафіксує потрібний результат (кількість відміток дальності  $N_D$ ).

Складний сигнал формується завдяки імпульсній модуляції тривалості зонduючого імпульсу, як показано на епюрах в контрольних точках 2 і 3 схеми. Оскільки вихідний сигнал фотоприймача бінарний, тобто відповідає логічним «0» та «1», то й узгоджений фільтр замість операції множення має використовувати операцію порівняння за модулем 2.

Відгук на виході узгодженого логічного фільтра (**УЛФ**) (контрольна точка 4) буде визначатися відповідно до виразу

$$R(n) = S * h = \sum_{m=0}^N S(m) \oplus h(n-m), n = \overline{0, N+M-2}, \quad (1)$$

де  $S(m)$ ,  $h(n)$  — дискретні відліки сигналу та імпульсної характеристики узгодженого фільтра;

\* — операція згортки;

$\oplus$  — операція виключаючого складання за модулем 2 з інверсією.

Бінарний код довжиною 8 та імпульсну характеристику УЛФ для такої послідовності наведено на **рис. 4**, а його структурну схему — на **рис. 5**.

Для підвищення завадостійкості зонduючий сигнал має задовольняти наступним критеріям:

- послідовність, що кодує зонduючий сигнал, має задовольняти умовам збалансованості чи мати вагу  $W = N/2$ , де  $N$  — довжина послідовності, парне число;
- рівень бічних пелюстків логічної автокореляційної функції (1) має бути якомога меншим;
- першим імпульсом складного зонduючого сигналу має бути рівень логічної одиниці.

Переліченим вимогам задовольняють рядки матриць Адамара [8], які пропонуємо використовувати для кодування інтервалу зонduючого сигналу.

Результати моделювання сигналів схеми лазерного вимірювача відстані з використанням складних сигналів на базі функцій Уолша — Адамара довжиною 8 наведені на **рис. 6**. Аналіз показує, що за наявності завад, сумарна тривалість яких досягає 40% від три-

Послідовність ( $N = 8$ )	{1 0 0 1 0 1 1 0}
Імпульсна характеристика	{0 1 1 0 1 0 0 1}

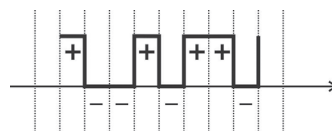


Рис. 4. Бінарний код довжиною  $N = 8$  та імпульсна характеристика УЛФ

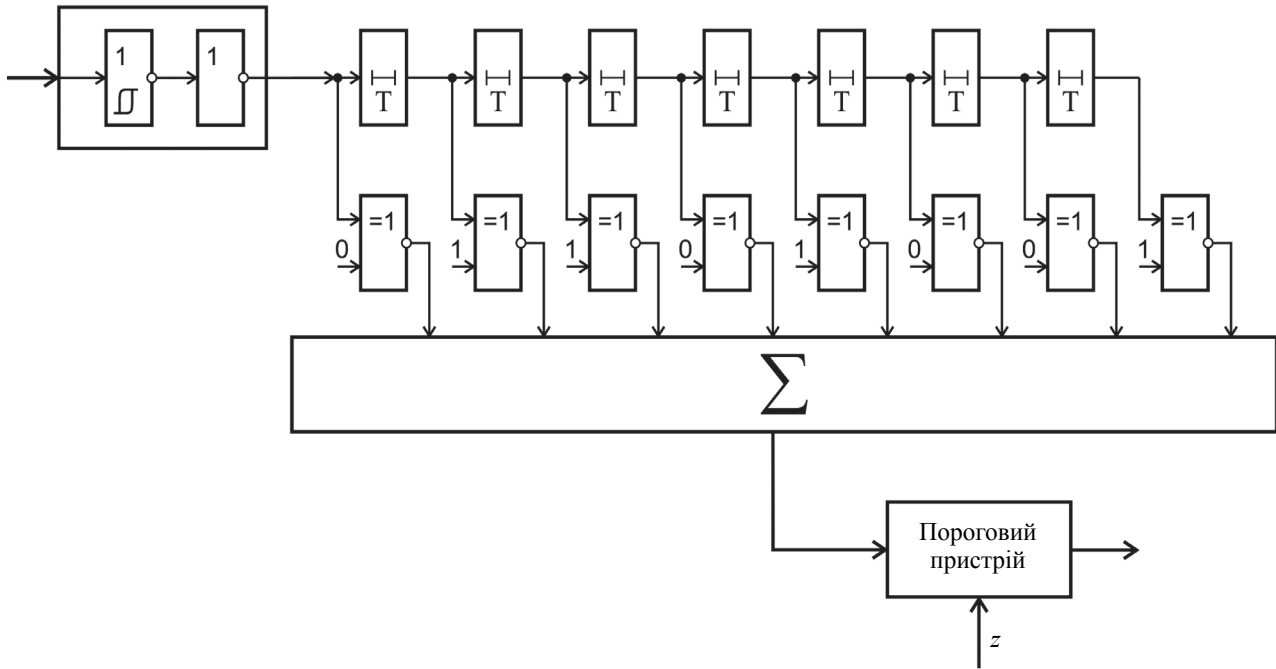


Рис. 5. Структурна схема узгодженого логічного фільтра для бінарної послідовності довжиною  $N = 8$

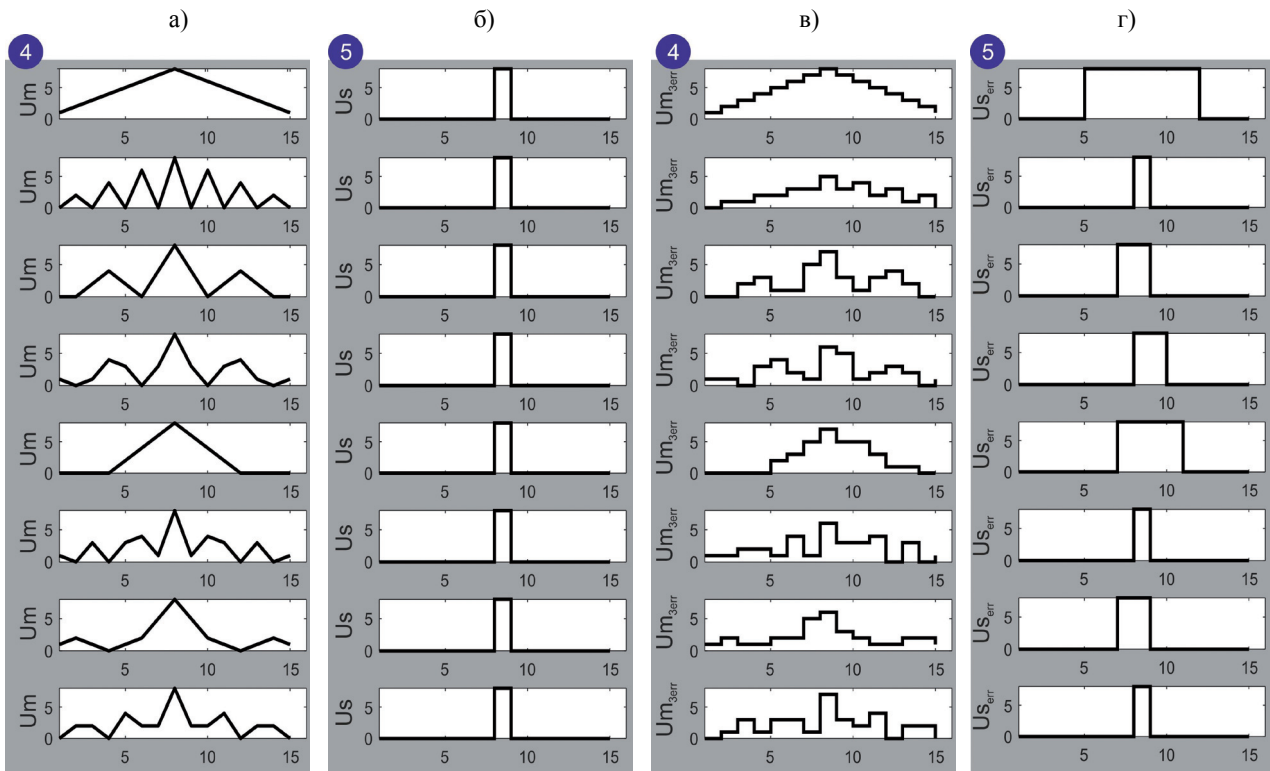


Рис. 6. Результати моделювання восьми зондуючих сигналів у контрольних точках 4, 5 схеми лазерного вимірювача відстані (див. рис. 3) з використанням складних сигналів на базі функцій Уолша — Адамара довжиною 8 для випадків відсутності (а, б) та наявності (в, г) активної завади:

$a$  — відгук  $U_m$  на виході УЛФ без помилок;  $б$  — сигнал  $U_s$  на виході порогового пристрою;

$в$  — відгук  $U_{m_{3err}}$  на виході УЛФ за наявності 3-кратної помилки;

$г$  — сигнал  $U_{s_{err}}$  на виході порогового пристрою за наявності 3-кратної помилки

валості зонduючого сигналу (рис. 6, в), результати вимірювання дальності будуть коректними в разі застосування кодууючої послідовності під номерами 2, 6 та 8, тому що положення імпульсу на виході порогового пристрою співпадає з моментом прийняття сигналу, а його тривалість дорівнює тривалості одного елементу зонduючого сигналу (рис. 6, з).

Результати моделювання підтверджують правомірність зробленого припущення щодо можливості використання логічного узгодженого фільтра з сигналами Уолша на основі матриць Адамара для боротьби з імпульсними завадами, що виникають на вході оптичного приймача лазерного вимірювача дальності.

#### Алгоритм пошуку найкращих ансамблів збалансованих сигналів

Пропонований нами алгоритм пошуку найкращих з точки зору мінімуму бічних пелюстків АКФ послідовностей представлено на рис. 7. Він працює за критерієм обмеженого перебору в класі збалансованих послідовностей з мінімальним рівнем  $U_{БП}$  бічних пелюстків АКФ.

За допомогою цього алгоритму знайдено двадцять послідовностей довжиною  $N = 8$ , що мають макси-

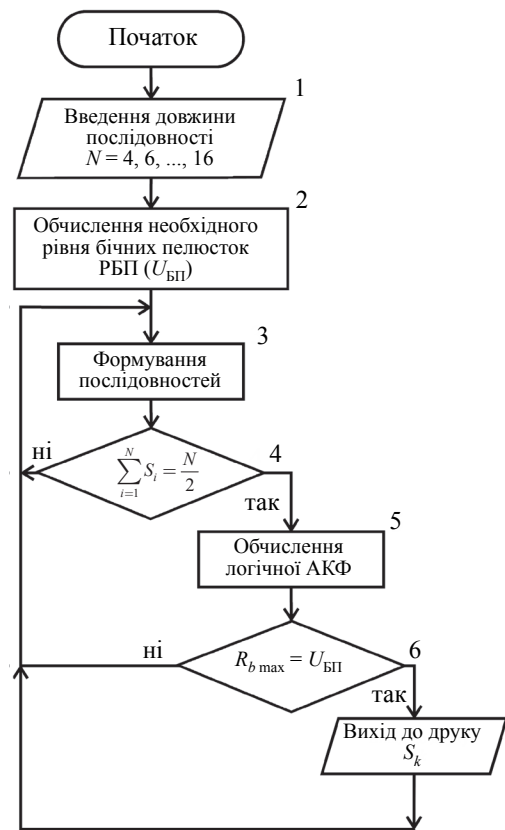


Рис. 7. Алгоритм пошуку найкращих за критерієм мінімуму бічних пелюстків АКФ послідовностей

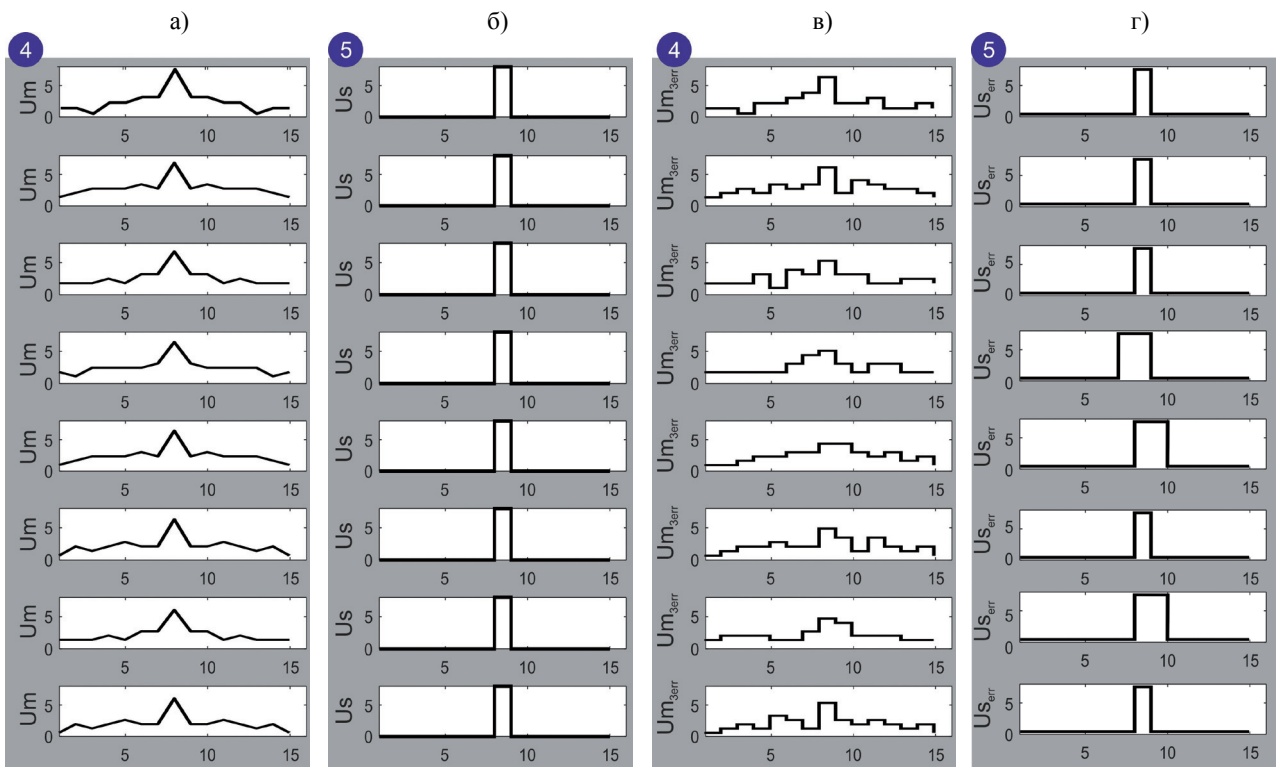


Рис. 8. Результати моделювання восьми зонduючих сигналів, що і на рис. 6, отримані з використанням збалансованих послідовностей довжиною 8

мальний бічний пелюсток  $R_{\text{БП}}$  логічної АКФ, що дорівнює 3:

$S1 = \{0\ 0\ 1\ 0\ 1\ 1\ 1\ 0\};$   
 $S2 = \{0\ 0\ 1\ 1\ 0\ 1\ 0\ 1\};$   
 $S3 = \{0\ 0\ 1\ 1\ 1\ 0\ 1\ 0\};$   
 $S4 = \{0\ 1\ 0\ 0\ 1\ 1\ 1\ 0\};$   
 $S5 = \{0\ 1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 1\ 1\};$   
 $S6 = \{0\ 1\ 0\ 1\ 1\ 0\ 0\ 1\};$   
 $S7 = \{0\ 1\ 0\ 1\ 1\ 1\ 0\ 0\};$   
 $S8 = \{0\ 1\ 1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 1\};$   
 $S9 = \{0\ 1\ 1\ 1\ 0\ 0\ 1\ 0\};$   
 $S10 = \{0\ 1\ 1\ 1\ 0\ 1\ 0\ 0\};$   
 $S11 = \{1\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 1\ 1\};$   
 $S12 = \{1\ 0\ 0\ 0\ 1\ 1\ 0\ 1\};$   
 $S13 = \{1\ 0\ 0\ 1\ 1\ 0\ 1\ 0\};$   
 $S14 = \{1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 1\ 1\};$   
 $S15 = \{1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 1\ 1\ 0\};$   
 $S16 = \{1\ 0\ 1\ 0\ 1\ 1\ 0\ 0\};$   
 $S17 = \{1\ 0\ 1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 1\};$   
 $S18 = \{1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 1\};$   
 $S19 = \{1\ 1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 1\ 0\};$   
 $S20 = \{1\ 1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 1\}.$

З двадцяти наведених послідовностей 10 задовольняють і умовам збалансованості, і стартовим вимогам (перший елемент послідовності дорівнює «1»). Також слід зазначити, що жодна з цих 20 послідовностей не є функцією Уолша.

Для коректного порівняння ефективності використання цих послідовностей та послідовностей Уолша виконаємо моделювання роботи далекоміра за аналогічних умов, тобто будемо використовувати 8 сигналів (номера з S11 по S18).

Як можна побачити з **рис. 8**, оптимальні функції мають більшу коректуючу здатність, ніж сигнали на базі функцій Уолша. Кількість помилок, що виправляються, становить  $t_{\text{eer}} = 2$ , якщо уражені ділянки з логічним рівнем «0». Максимальна кількість уражених елементів, за якої можливе виправлення помилок, дорівнює  $t_{\text{eer}} = 6$  за умови, що завада вплине на чотири логічних «1» та два логічних «0». Таким чином, використання оптимальних сигналів, знайдених методом обмеженого перебору, є більш доцільним, ніж за допомогою функцій Уолша.

## Висновки

Запропонована схема узгодженого фільтру, що реалізує операцію логічної згортки, враховує особливості обробки сигналу в оптичному діапазоні. При цьому відсутній ефект накопичування енергії завади, а на результат впливає тільки сумарна тривалість дії завади відносно тривалості зондуючого сигналу. Запропонований фільтр є ефективним для обробки сигналів на основі матриць Адамара та оптимальних сигналів, знайдених методом часткового перебору.

Розроблена структурна схема імпульсного лазерного далекоміра забезпечує високу достовірність результатів виміру відстані до рухомої цілі в умовах імпульсних завад.

## ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Фуфаев А.В., Фёдорцев Р.В. Повышение точности измерения дистанции в дальнометрическом канале прибора наблюдения с использованием полупроводникового лазера. *Приборы и методы измерений*, 2013, № 2, с. 95–102.
2. Dudnik A. Investigation of laser rangefinders with sensor network interface. *Technology audit and production reserves*, 2018, no. 4/2(42). <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2018.141190>
3. Вильнер В., Ларюшин А., Рудь Е. Оценка возможностей светолокационного измерителя дальности с накоплением. *Фотоника*, 2007, № 6, с. 22–26.
4. Robinson T.S., Consoli F., Giltrap S. et al. Low-noise time-resolved optical sensing of electromagnetic pulses from petawatt laser-matter interactions. *Scientific Reports*, 2017, no. 7(1), p. 983. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-01063-1>
5. Barr K. *Method for improving the received signal to noise ratio of a laser rangefinder*. US Patent 7184130, 2007.
6. Брагинцев И.А., Зайцев Е.А., Кононенко А.Г. и др. Повышение помехоустойчивости фазовых лазерных дальнометрических систем. *Техническая электродинамика*. 2014, № 3, с. 91–96.
7. Легкий В. Н., Галун Б. В., Литвиненко С. А. и др. Принципы построения помехоустойчивых миниатюрных лазерных импульсных дальнометров, высотометров и датчиков для бортовых и транспортных систем. *Оптический журнал*, 2011, т. 78, № 5, с. 64–69.
8. Мазурков М.И. *Системы широкополосной радиосвязи*. Одесса, Наука и техника, 2010.

Дата надходження рукопису до редакції 10.02 2020 р.

DOI: 10.15222/ТКЕА2020.1-2.08  
УДК 621.382:004.358

А. В. САДЧЕНКО, О. А. КУШНИРЕНКО, Е. К. КОШЕЛЕВ

Украина, Одесский национальный политехнический университет

E-mail: koa@opu.ua

## ПОМЕХОУСТОЙЧИВАЯ СИСТЕМА ИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ДАЛЬНОМЕТРИИ

Предложена структурная схема лазерного дальнометра с возможностью обнаружения импульсных помех, которые действуют в пределах его дальности, и исправления ошибок, возникающих в структуре отраженного от цели сигнала. Основой схемы дальнометра является логический согласованный фильтр, реализующий операцию логической свертки, структура которого содержит умножители. На основе требований, предъявляемых к кодирующим последовательностям, были найдены оптимальные с точки зрения обеспечения лучшей корректирующей способности структуры бинарных зондирующих сигналов длины 8.

Сравнение корреляционных свойств найденных последовательностей и последовательностей, которые строятся с помощью функций Уолша, показало преимущество оптимальных последовательностей по критерию минимума уровня боковых лепестков АКФ.

Проведенное моделирование работы дальномера в условиях импульсных помех показало целесообразность использования логического фильтра для тех случаев, когда продолжительность помехи не превышает 1/3 от продолжительности зондирующего сигнала.

Ключевые слова: лазерная дальнометрия, логическая свертка, функции Уолша, бинарные последовательности, логический согласованный фильтр.

DOI: 10.15222/TKEA2020.1-2.08  
UDC 621.382:004.358

A. V. SADCHENKO, O. A. KUSHNIRENKO, E. K. KOSHELEV

Ukraine, Odessa National Polytechnic University

E-mail: koa@opu.ua

## ANTI-INTERFERENCE PULSED LASER RANGING SYSTEM

Pulsed laser rangefinders prove to be cost-effective and practical devices when used at distances of several tens of kilometers due to their compactness, portability and energy efficiency. However, the measurement accuracy is significantly reduced by the presence of pulsed interference affecting the input of the optical receiver both during the sensing period and when the reflected signal is being received. Using the algorithms with the accumulation and subsequent processing of the results of several successive measurements reduces the speed of decision-making and does not guarantee the convergence of the results to the real value of the distance.

The paper proposes a structural diagram of a laser rangefinder with the ability to detect pulsed interference in the range interval and correct errors that occur in the structure of the signal reflected from the target. The basis of the rangefinder circuit is a logical consistent filter, the structure of which contains multipliers (multiplication operations).

The following requirements were formulated for the structure of the probe signal:

- the first element should always be set to +1 to synchronize the receiver decoder;
- the weight of the coding sequence is equal to half its length;
- the length of the coding sequence is even.

Based on the requirements for coding sequences, the optimal structures of binary probing signals of length 8 were found, providing the best corrective ability.

Comparison of the correlation properties of the found sequences and the sequences that are constructed using the Walsh functions showed the advantage of the optimal sequences by the criterion of the minimum level of the ACF side lobes.

The simulation of the rangefinder under pulsed noise conditions has shown that the logical filter is advisable to use for those cases when the duration of the obstacle does not exceed 1/3 of the duration of the probing signal.

Keywords: laser ranging, logical convolution, Walsh functions, binary sequences, logical matched filter.

### REFERENCES

1. Fufaev A. V., Feodortsev R. V. Enhance the accuracy of the distance of distance measuring channel of the observation device using semiconductor laser. *Devices and Methods of Measurements*, 2013, no. 2, pp. 95–102. (Rus)
2. Dudnik A. Investigation of laser rangefinders with sensor network interface. *Technology audit and production reserves*, 2018, no. 4/2(42). <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2018.141190>
3. Wil'ner V., Laryushin A., Rud' Ye. Evaluation of opportunities that have the optical pulse range-finder with accumulation. *Photonics*, 2007, no. 6, pp. 22–26. (Rus)
4. Robinson T.S., Consoli F., Giltrap S. et al. Low-noise time-resolved optical sensing of electromagnetic pulses from petawatt

- laser-matter interactions. *Scientific Reports*, 2017, no. 7(1), p. 983. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-01063-1>
5. Barr K. *Method for improving the received signal to noise ratio of a laser rangefinder*. US Patent 7184130, 2007.
6. Bragynets I.O., Zaitsev E.O., Kononenko O.G. et al. Increasing the noise immunity of the phase laser ranging systems. *Tekhnichna Elektrodynamika*, 2014, no. 3, pp. 91–96. (Rus)
7. Legkiy V. N., Galun B. V., Litvinenko S. A. et al. [Principles for the construction of noise-immune miniature laser pulse rangefinders, altimeters and sensors for airborne and transport systems]. *Journal of Optical Technology*, 2011, vol. 78, no. 5, pp. 64–69. (Rus)
8. Mazurkov M.I. *Sistemy shirokopolosnoy radiosvyazi* [Broadband radio systems]. Odessa, Nauka i Tekhnika, 2010, 340 p. (Rus)

### Опис статті для цитування:

Садченко А. В., Кушніренко О. А., Кошелєв Є. К. Завадостійка система імпульсної лазерної дальнометрії. *Технологія і конструювання в електронній апаратурі*, 2020, № 1–2, с. 8–14. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2020.1-2.08>

### Cite the article as:

Sadchenko A. V., Kushnirenko O. A., Koshelev E. K. Anti-interference pulsed laser ranging system. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoy Apparature*, 2020, no. 1–2, pp. 8–14. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2020.1-2.08>