

doi: <https://doi.org/10.15407/kfnt2021.03.084>

УДК 520.2.075

**В. О. Пап, Ю. М. Глущенко, М. М. Медведський**

Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України  
вул. Академіка Заболотного 27, Київ, Україна, 03143  
E-mail: medved@mao.kiev.ua

### **Блок синхронізації системи дзеркал, що використовується для розділення оптичних каналів телескопа ТПЛ-1**

*Метод лазерної локації ШСЗ базується на вимірюванні часу проходження лазерного імпульсу від передавача до супутника і назад до приймача. Особливістю телескопів ТПЛ є те, що прийом і передача лазерного сигналу здійснюється одним і тим же телескопом, що вимагає додаткових пристроїв для розділення зондувального та прийнятого сигналів. Крім того, цей телескоп часто служить також і для візуального супроводу об'єкта, що додатково ускладнює оптичну схему. У більшості випадків сигнали розділяють механічним чином — за допомогою дзеркал, що обертаються. Дзеркала в одному положенні пропускають сигнал у певний канал, а в іншому положенні — відбивають його в інший канал. Період обертання дзеркал відповідає періоду роботи лазерного передавача. Обидва дзеркала обертаються з однаковим періодом, але із зсувом фаз. Як компаратор фаз використовується логічна схема, побудована на двох D-тригерах та одному елементі 2І-НІ. Розглядається схема і принцип роботи пристрою для синхронізації дзеркал сигналами керівного комп'ютера та давачів положення дзеркал. Даний пристрій успішно використовується на станції лазерної локації Латвійського університету «Рига-1884», що входить до складу мережі ILRS.*

**Ключові слова:** лазерна локація штучних супутників Землі, телескоп ТПЛ, розділення оптичного каналу, фазовий детектор, ILRS, SLR.

Лазерна локація ШСЗ є одним із ключових методів космічної геодезії [1, 2, 4, 5, 8, 9]. Суть методу полягає у точному вимірюванні часу проходження лазерного імпульсу від передавача до супутника і назад.

Точність таких вимірювань зараз сягає 0.5...2 см на одне вимірювання. Це дозволяє забезпечити точне визначення орбіти не лише для геодинамічних супутників, а й для супутників глобальної навігації, супутників дистанційного зондування Землі та навіть до Місяця.

Частина сучасних лазерних станцій використовує один телескоп і для передачі лазерного імпульсу, і для збору відбитих від супутника фотонів для подальшої реєстрації приймачем. Також цей же телескоп іноді використовується і для візуального супроводу об'єкта під час локації. Для цього використовуються відповідні оптико-механічні вузли, які розділяють в часі доступ до телескопа кожній підсистемі.

В даний час у мережі ILRS працюють чотири лазерних віддалеміри на базі телескопа ТПЛ-1 [3, 6, 7, 10]. На жаль, на кожному із них використовується своя, оригінальна підсистема узгодження.

Для розділення оптичних потоків на лазерній станції «Рига-1884» використовуються дзеркала, що обертаються з періодом генерації лазерних імпульсів (як правило, 100 мс). Метою даної розробки була модернізація системи контролю та керування двигунами, які обертають дзеркала, що забезпечила б стабільну та надійну роботу в широкому діапазоні температур та електромагнітних завад. Штатна система не забезпечувала надійної та стабільної роботи.

Спрощену оптичну схему лазерної станції «Рига-1884» Латвійського університету приведено на рис. 1. У момент, коли «передавальне» дзеркало розміщується на оптичній осі телескопа, воно відбиває світло, що потрапляє на нього. В іншому випадку світло проходить вздовж оптичної осі без змін.

У приймальному каналі лазерної станції встановлено приймач лазерного випромінювання (фотопомножувач (ФЕП)) та пристрій для візуального супроводу супутника (електрооптичний перетворювач (ЕОП) чи телевізійна камера). Для комутації роботи між ФЕП та ЕОП служить друге аналогічне дзеркало, яке в заданий момент часу перенаправляє відбитий від супутника сигнал на ФЕП, а весь інший час світло від телескопа потрапляє на систему візуального спостережен-

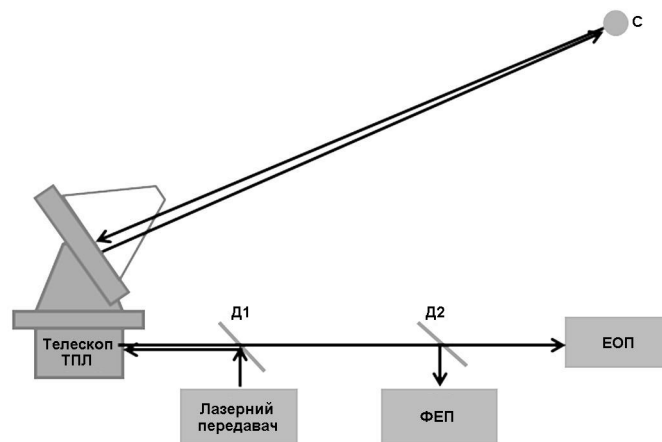


Рис. 1. Оптична схема і передачі лазерного імпульсу на лазерній станції «Рига-1884»

ня. Друге дзеркало теж обертається з частотою першого, але при цьому його фаза зсунута відносно першого (лазерного) дзеркала на кут :

$$\frac{360}{T},$$

де  $T$  — період обертання дзеркала, — подвоєний час польоту лазерного імпульсу до супутника. Цей час розраховується з ефемериди супутника комп'ютером.

У момент часу, коли дзеркало Д1 розміщується на головній оптичній осі телескопа, лазерний передавач генерує короткий оптичний імпульс. Цей імпульс відбивається від дзеркала Д1 і потрапляє в телескоп, котрий направляє його на супутник (С). Відбитий від супутника імпульс попадає на дзеркало Д2, яке через час буде перебувати на головній оптичній осі телескопа та направить прийнятий сигнал на фотоприймач. Дзеркало Д1 має невеликі розміри, тому після відбивання імпульсу лазера в телескоп воно не перекриває потік світла з телескопа. Дзеркало Д2 також має невеликі розміри, тому перебуває на головній оптичній осі телескопа теж короткий проміжок часу, а весь інший час світло поступає на ЕОП для візуального супроводу об'єкта.

Під час локації супутника комп'ютер, який керує телескопом, видає сигнал на запуск лазера і сигнал для синхронізації приймального дзеркала, так званий RG-сигнал (Range Gate). Обидва сигнали надходять з частотою 10 Гц і з різницею фаз, пропорційною часу польоту сигналу від телескопа до супутника і назад. Як давачі положення кожного дзеркала використовуються магнітні головки, які закріплені нерухомо, та магніти, які обертаються разом з дзеркалами. Дзеркала приводяться в рух синхронними двигунами 50 Гц, 230 В через редуктори 1:5. Блок-схему пристрою зображено на рис. 2.

Блок синхронізації дзеркал (БСД) складається з двох ідентичних каналів, які мають тільки різні вхідні сигнали. Керування передавальним каналом здійснюється імпульсами частотою 10 Гц від стандарту частоти і сигналом, який приходить від магнітної головки «передавального» дзеркала. Відповідно керування приймальним каналом відбувається імпульсами частотою 10 Гц, які приходять від комп'ютера та визначають положення «приймального» дзеркала, а також сигналом від магнітної головки цього дзеркала.

Відомо, що надійність роботи пристроїв, подібних до БСД, суттєво залежить від якості вхідних сигналів. Необхідно взяти до уваги наявність значних електромагнітних завад від лазерного передавача. Як було зазначено вище, за давачі положення дзеркал служать магнітні головки. Амплітуда сигналу з таких датчиків становить 10 мВ. При спробі передати такий сигнал на кілька метрів навіть екранованим кабелем, амплітуда наведених завад фактично зрівнюється з корисним сигналом, внаслідок чого стає неможливою стабільна робота блоку синхронізації дзеркал. Вирішенням цієї проблеми стало створення формувача імпульсів магнітної головки безпосередньо біля

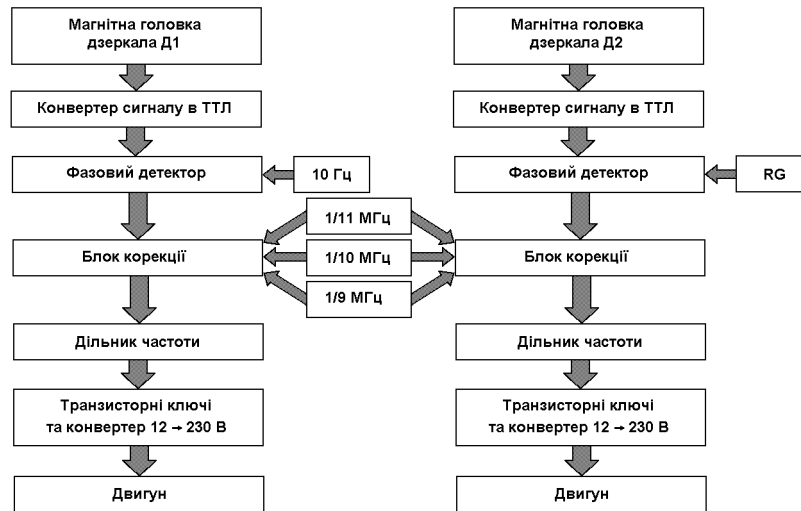


Рис. 2. Блок-схема пристрою для синхронізації дзеркал

телескопа та передачі корисного сигналу в рівнях ТТЛ логіки до БСД, де, з метою надійності прийому, було додатково використано логічну інтегральну схему з підвищеним рівнем захисту від завад.

Основною відмінністю нової системи є цифровий компаратор фаз. На відміну від аналогового (який використовувався раніше), він забезпечує значно більшу чутливість до зсуву фаз при нульовій різниці фаз, а також практично не залежить від завад. Схему фазового компаратора взято із сайту <https://digteh.ru/digital/FC.php>.

Підсилений і відфільтрований сигнал від магнітної головки та сигнал від стандарту частоти приходять на фазовий детектор (ФД), виконаний на двох D-тригерах і елементі 2I-НІ (див. рис. 3). Сигнал на виході А вказує на випередження сигналу 10 Гц відносно сигналу магнітної головки. При цьому сигнал на виході В настільки короткий, що ним можна знехтувати. Відповідно, сигнал на виході В вказує на випередження сигналу від магнітної головки відносно сигналу 10 Гц. Відмітимо деяку неоднозначність, яка з'являється на початку роботи фазового детектора. Якщо ФД починає роботу у момент  $t_1$ , то на виході В буде відставання опорного сигналу 10 Гц відносно сигналу магнітної головки. Якщо ж ФД починає роботу у момент  $t_2$ , то на виході А буде випередження сигналу магнітної головки (рис. 4). Як в першому, так і в другому випадках тривалість вихідного сигналу може змінюватися від 0 до 100 мс (період одного обороту дзеркала), час синхронізації може становити від 0 до 100 с, в середньому 50 с.

Вихідні сигнали фазового детектора надходять на схему нормування, яка видає імпульси стандартної довжини для блоку корекції таким чином, щоб швидкість синхронізації як у випадку випередження, так і у випадку відставання становила 0.1 мс за 100 мс, тобто за один повний оберт дзеркала. Блок корекції передає одну з поділених частот

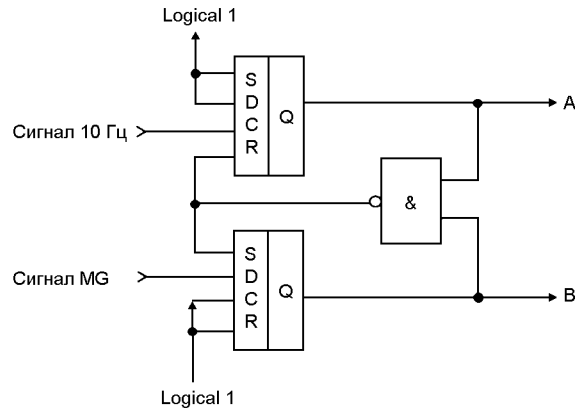


Рис. 3. Схема фазового детектора

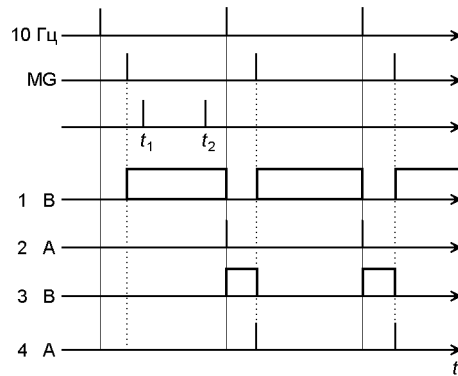


Рис. 4. Часові діаграми роботи фазового детектора

1/11, 1/10 або 1/9 МГц, в залежності від сигналів А і В, на вхід дільника частоти, який далі ділить цю частоту до 50 Гц (0 або  $\pm 10\%$  в залежності від напрямку корекції чи робочий режим).

Із блоку корекції імпульси приходять на подільник частоти, вихід котрого керує транзисторними ключами, навантаженими на трансформатор, з метою отримання квазісинусоїдальної напруги 230 В. Таким чином, в залежності від сигналів фазового детектора частота напруги живлення двигунів може змінюватись у межах  $50 \pm 5$  Гц для забезпечення необхідної різниці фаз між дзеркалами.

Слід відмітити, що блок синхронізації дзеркал може працювати не лише з двигунами синхронного типу, але також і з кроковими двигунами та двигунами постійного струму. Також передбачено можливість роботи даного блоку із системою управління телескопом, для якої положення другого дзеркала буде задаватись блоком керування телескопом, а замість сигналу фазового зсуву RG буде подаватись 8-бітний код від комп'ютера.

**Висновок.** Блок синхронізації системи дзеркал, що використовується для розділення оптичних каналів, успішно функціонує на станції лазерної локації «Рига-1884» і дозволяє працювати як з низько-, так і з високоорбітальними супутниками. Надійність блоку підтверджена 6-та 8-годинними неперервними лазерними спостереженнями супутників. Крім того, цей блок дозволив зменшити час виходу на робочий режим.

## REFERENCES

1. Degnan J. J. (1994) SLR 2000: an automated, eyesafe satellite ranging station for the future. Proc 9th Int. Workshop on Laser Ranging. Austral. Govt Publ. Serv. 312. URL: <https://ilrs.gsfc.nasa.gov/about/reports/workshop/lw09.html> (Last accessed: 10.12.2020).
2. Degnan J. J., McGarry J. F. (1997) SLR2000: Eyesafe and autonomous single photoelectron satellite laser ranging at kilohertz. *SPIE*, 3218, Laser Radar Ranging and Atmospheric Lidar Techniques, 63—77.
3. del Pino J., Liubich I., Melkov S., Horelnykov S., Frolkov K., Salmins K. (2016) SLR Station 1884 Riga Upgrading the Station Calibration Procedures. URL: [https://cdis.nasa.gov/lw20/docs/2016/posters/P11-delPino\\_poster.pdf](https://cdis.nasa.gov/lw20/docs/2016/posters/P11-delPino_poster.pdf) (Last accessed: 10.12.2020).
4. Eckl J. J., Schreiber K. U., Leidig A., Schüler T. (2017) Ground Station Requirements for the ELT experiment. URL: [https://cdis.nasa.gov/2017\\_Technical\\_Workshop/docs/posters/ilrsTW2017\\_s1\\_Eckl\\_poster.pdf](https://cdis.nasa.gov/2017_Technical_Workshop/docs/posters/ilrsTW2017_s1_Eckl_poster.pdf) (Last accessed: 10.12.2020).
5. Gross R. (2008). Laser Ranging Contributions to Earth Rotation Studies. Proc. 16th Int. Workshop on Laser Ranging, 1, 10—15. URL: <https://ilrs.gsfc.nasa.gov/about/reports/workshop/lw16.html> (Last accessed: 10.12.2020).
6. Medvedskyy M. M., Hlushchenko Yu. M., Aribjanov M. T. (2016) *Lidar system on on Kiev SLR 1824*. URL: [https://cdis.nasa.gov/lw20/docs/2016/posters/P03-Medvedskyy\\_poster.pdf](https://cdis.nasa.gov/lw20/docs/2016/posters/P03-Medvedskyy_poster.pdf) (Last accessed: 10.12.2020).
7. Pap V. O., Hlushchenko Yu. M. (2017) Modernization of the mechanical system of the TPL-1 telescope of the Laser Ranging Station “GOLOSIIV-KYIV”. *Space Science and Technology*, 23(5), 62—65. (In Ukrainian).
8. Pavlis E., Kuzmich-Cieslak M. (2008). SLR and the Next Generation Global Geodetic Networks. Proc 16th Int. Workshop on Laser Ranging. 1. 183—189.
9. Pearlman M. R., Degnan J. J., Bosworth J. M. (2002). The international laser ranging service. *Adv. Space Res.* 30(2), 135—143.
10. *International Laser Ranging Service*. (2020) URL: [https://ilrs.gsfc.nasa.gov/network/stations/active/RIGL\\_general.html](https://ilrs.gsfc.nasa.gov/network/stations/active/RIGL_general.html) (Last accessed: 10.12.2020).

V. O. Pap, Yu. M. Hlushchenko, M. M. Medvedskiy

Main Astronomical Observatory, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

## THE ROTATION MIRRORS SYNCHRONIZATION BLOCK FOR SEPARATION OF OPTICAL CHANNELS

As it is known, the satellite laser ranging method is to measure the transit time of a laser pulse from a transmitter to the satellite and back to the receiver. A special feature of the TPL telescope is that the transmitting and receiving of the laser signal are performed with the same telescope. This requires additional equipment to separate these signals. Besides, this telescope is also used for visual tracking of the object, which adds complexity to the

optical design. In most cases, the signals are separated mechanically, i.e. using rotating mirrors. In one position, the mirrors transmit the signal to a specific channel, in the other one, they reflect the optical signal into another channel. Each mirror splits one optical channel into two channels. The rotational speed corresponds to the frequency of the laser transmitter. Both mirrors rotate at the same frequency but with a different phase. A logic circuit, which is built on two D-triggers and one 2-input NAND element, is used as a phase detector. The article discusses the scheme and principle of the operation of the mirror synchronization device by signals of the control computer and mirror position sensors. This device has been successfully used at the "Riga-1884" laser location station of the University of Latvia.

**Keywords:** laser location of the Earth artificial satellites, TPL-1 telescope, optical channel separation, phase detector.

Стаття надійшла до редакції 26.11.2019

Після доопрацювання 10.12.2020

Прийнята до друку 15.01.2021