



<https://doi.org/10.36023/ujrs.2021.8.1.186>

УДК 528.8:528.7:528.4

Основні характеристики та перспективи розвитку лазерних гіроскопів

С. І. Альперт *

ДУ “Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України”, вул. Олеса Гончара 55-Б, Київ 01054, Україна

На даний час безпілотні літальні апарати (дрони) застосовують для вирішення численних завдань дистанційного зондування Землі. Вони дають нові можливості для проведення екологічного моніторингу, забезпечуючи дослідників зображеннями з дуже високою роздільною здатністю. Безпілотні літальні апарати використовують для вирішення сільськогосподарських завдань. Вони дають детальну картину полів. Цифрові зображення, отримані безпілотними літальними апаратами (дронами), також використовують в лісовому господарстві, а також під час оцінки наслідків стихійних лих. Дрони приносять користь під час пошуку, розвідки та видобування корисних копалин, у топографічній зйомці. Лазерний гіроскоп є важливим компонентом системи управління польотом дронів. Лазерні гіроскопи забезпечують контроль за орієнтацією дрона і надають необхідну навігаційну інформацію для центральних систем управління польотом. Лазерний гіроскоп є одним з найважливіших приладів, який дозволяють дрону літати плавно навіть при сильному вітрі. Плавність польоту дозволяє отримувати високоякісні зображення. На даний час основною функцією гіроскопічних технологій є вдосконалення льотних можливостей безпілотних літальних апаратів.

У даній статті описано структуру та основні характеристики лазерних гіроскопів. Відзначено, що лазерний гіроскоп працює за принципом ефекту Саньяка, відомого з інтерферометрії, який виникає внаслідок обертання. Описано основні переваги і недоліки лазерних гіроскопів. Проведено порівняльний аналіз механічного і лазерного гіроскопів.

Також було відзначено, що лазерні гіроскопи застосовуються в різних областях, таких як: інерціальні навігаційні системи, літаки, кораблі, безпілотні літальні апарати (дрони) і штучні супутники Землі. Розвиток лазерної техніки створює передумови для підвищення точності та інших технічних характеристик лазерних гіроскопів.

Ключові слова: лазерний гіроскоп, ефект Саньяка, безпілотний літальний апарат, дистанційне зондування Землі

© С. І. Альперт. 2021

1. Вступ

На даний момент в умовах зростаючого антропогенного впливу на навколишнє природне середовище виникає гостра необхідність у проведенні ефективного моніторингу територій. Аерофотозйомка місцевості є одним із найбільш відомих методів моніторингу, який використовується в різних цілях, найважливішими з яких є складання та коригування топографічних карт, геологічні дослідження, вирішення різних завдань підсупутникового моніторингу в аерокосмічному комплексі. Аерофотозйомка земної поверхні може виконуватися в залежності від поставлених завдань за допомогою літаків та гелікоптерів, аеростатів, мотодельтапланів, а також безпілотних літальних апаратів (БПЛА) (King, 1998; Horowitz et al, 2020). Одним із перспективних методів отримання геодезичної основи моніторингу є метод дистанційного картографування з використанням БПЛА (дронів). Слід зауважити, що однією з найбільш важливих складових БПЛА є саме гіроскоп.

Зараз із розвитком науки і техніки у системах інерціальної навігації широке застосування отримав лазерний гіроскоп. Тому метою даної статті є проведення аналізу принципу дії та основних сфер застосування лазерних гіроскопів, зокрема, для забезпечення роботи БПЛА.

Гіроскоп є однією із основних складових безпілотного літального апарату, який забезпечує отримання даних про нахил, орієнтацію та напрям руху, що, в свою чергу, забезпечує автоматичне вирівнювання дрона у польоті. Тобто гіроскоп є необхідною складовою для підтримки рівноваги безпілотника.

Слід зазначити, що гіроскопи якісних дронів резонують лише на високих частотах — за межами звукового діапазону, який чує людина. Це зроблено для того, щоб навколишній звуковий фон (шум автомобілів, механізмів, звуки природи) не заважав нормальному функціонуванню безпілотників.

Саме технологія гіроскопічної стабілізації забезпечує безпілотний політ апарата. При цьому гіроскоп миттєво реагує на сили, що чинять тиск на дрон, надаючи необхідну навігаційну інформацію центральному контролеру польоту.

2. Лазерний гіроскоп та його основні характеристики

Термін “гіроскоп” має грецьке походження та походить від двох слів, що означають “круглий” та “дивлюся”. Сенс роботи даного приладу полягає у тому, що він може змінювати свою орієнтацію за певними кутами щодо певної інерціальної системи відліку.

Передумовою для створення лазерного гіроскопа були дослідження в області оптики рухомих тіл. Так у 1913 р. фран-

* E-mail: sonyasonet87@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-7284-6502>

Tel: +380 95 901 57 37; +380 44 239 74 12

цузький фізик Жорж Саньяк відкрив “вихровий оптичний ефект”, що дозволяє оптичними методами вимірювати швидкість обертання об’єкта щодо інерціальної системи відліку. В експерименті Саньяка було встановлено взаємозв’язок між величиною зміщення інтерференційної картини, утвореної на виході кільцевого інтерферометра світловими променями, що поширюються назустріч одне одному, та його кутовою швидкістю.

Лазерний гіроскоп — це оптичний прилад, який використовують для вимірювання кутової швидкості. Принцип роботи лазерного гіроскопа заснований на ефекті Саньяка (Anderson et al., 1994), що характеризується фазовим зсувом зустрічних світлових хвиль, що виникає в обертовому кільцевому інтерферометрі (Рис. 1).

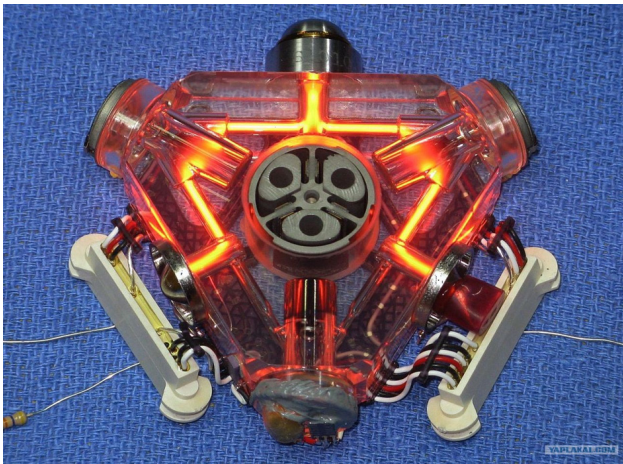


Рис. 1. Лазерний гіроскоп

Наведемо основні поняття та означення. Ефект Саньяка — явище інтерференції, що виникає внаслідок обертання та проявляє себе в кільцевій інтерферометрії. Нагадаємо, що інтерференція — це взаємне збільшення або зменшення результуючої амплітуди двох або декількох когерентних хвиль при їх накладенні одна на одну. При цьому інтерференція супроводжується чергуванням в просторі максимумів та мінімумів інтенсивності, а її розподіл називається інтерференційною картиною.

Також слід зазначити, що когерентність хвиль характеризується корельованим протіканням в часі й у просторі декількох випадкових хвильових процесів, що, в свою чергу, дає змогу отримувати інтерференційну картину при їхньому додаванні. При цьому умовою когерентності є незмінюваність різниці між фазами коливань у часі, що є можливим лише при умові, якщо хвилі є однаковими за довжиною.

При роботі лазерного гіроскопа в резонаторі генеруються два промені, що прямують в протилежних напрямках по замкненому кільцю. Потім дані промені зводяться разом, в результаті отримується інтерференційна картина, період якої становить близько 1 мм. Підраховуючи кількість смуг інтерференційної картини або їх часток (від 1/2 до 1/8), що проходять по фотоприймачу за одиницю часу накопичення (від 1 мс до 1000 с), можна визначити кут повороту лазерного гіроскопа навколо вхідної вісі за час накопичення, а отже і середню кутову швидкість за цей час.

При цьому розміри інтерференційної картини залежать від площі кільця, а положення інтерференційних смуг залежить від частоти обертання установки. При обертанні відбувається

генерація хвиль різної частоти для різних напрямків. Це відбувається із-за різної оптичної довжини резонатора для різних напрямків обходу (за та проти напрямку обертання).

Різниця частот в лазерному гіроскопі, що виникає внаслідок обертання, записується наступним чином:

$$\Delta\nu = \frac{4A\Omega}{L\lambda}, \quad (1)$$

де A — площа, що охоплюється променем, L — периметр резонатора, Ω — кутова швидкість обертання гіроскопа, λ — довжина хвилі (Masek et al., 1963).

Найпростіша конструкція лазерного гіроскопу являє собою пристрій із трьома дзеркалами-відбивачами, що розміщені по кутах контуру таким чином, що утворюється замкнута траєкторія для світлового променя. Замкнута траєкторія має вигляд кільця. Лазерний промінь створюється двома квантовими генераторами. При цьому один квантовий генератор посиляє випромінювання за годинниковою стрілкою, а другий квантовий генератор — проти. Як правило в лазерному гіроскопі встановлюється тільки один оптичний квантовий генератор, який містить два або більше активних елементів, які формують промені, що рухаються в протилежних напрямках.

Слід зазначити, що світлове випромінювання слабшає при відбитті від дзеркал, проходженні від дзеркала до дзеркала та при проходженні через напівпрозоре дзеркало і призму. Тому необхідно, щоб коефіцієнт посилення світлових променів уздовж всього шляху був не менше одиниці. Також ще однією важливою вимогою є те, щоб на довжині шляху лазерних променів могло б розміститися ціле число довжин хвиль, які генеруються лазерами, оскільки зсув фаз світлових коливань в порожнині резонатора повинен дорівнювати нулю. Для цього частота коливань лазера повинна бути такою, щоб підсилююче середовище дало б коефіцієнт посилення, який є достатнім для компенсації втрат у відбиваючих та інших елементах оптичного контуру лазера.

При повороті кільцевого резонатора оптичні шляхи, по яким проходять промені, що рухаються за і проти годинникової стрілки є різними. Різниця між оптичними шляхами сприяє виникненню різниці частот коливань, які генеруються. При цьому різниця частот коливань визначає швидкість обертання резонатора.

Зазвичай резонатор лазерного гіроскопа має вигляд кільцевого резонатора з трьома або чотирма дзеркалами. При цьому резонатор може бути як і моноблочним, так і складатися із окремих елементів. Резонатор може мати форму трикутника або квадрата.

Два лазерних променя, що генеруються і посилюються у гіроскопі, безперервно циркулюють по резонатору в протилежних напрямках. При цьому у лазерному гіроскопі створюється і підтримується стояча хвиля.

Нагадаємо, що стояча хвиля називається хвиля, яка при будь-якій фазі коливань, не поширюється у просторі, при цьому характерною її особливістю є наявність вузлів, у яких амплітуда хвилі дорівнює нулю, та наявність пучностей, у яких амплітуда є максимальною, при цьому положення пучностей та вузлів залишається незмінним у просторі.

Положення вузлів і пучностей стоячої хвилі не змінюється, якщо гіроскоп не обертається відносно інерціальної системи відліку. Також слід зазначити, що при повороті резонатора фотоприймачі вимірюють кут повороту та фіксують зміщення інтерференційних смуг. Далі, підраховуючи кількість смуг отриманої інтерференційної картини або їх часток, визначається кут повороту лазерного гіроскопа навколо вхідної вісі та середня кутова швидкість.

На даний момент точність лазерних гіроскопів є досить високою. Лазерні гіроскопи здатні реєструвати швидкість обертання менше ніж 0.1 град/год, вимірювати різницю оптичних траєкторій із точністю до 10^{-5} нм та фіксувати частотні зміни близько 0.1 Гц при наявності робочої частоти 10^{14} – 10^{15} Гц.

2.1. Переваги лазерного гіроскопа

- цифровий вихідний сигнал;
- малий час готовності;
- відсутність рухомих частин (в деяких випадках);
- лазерний гіроскоп є незамінним оптичним приладом для вимірювання кутової швидкості, що застосовується в системах інерціальної навігації.

2.2. Недоліки лазерного гіроскопа

При роботі лазерного гіроскопа виникають похибки при визначенні кута повороту, що обумовлені:

- дрейфом нульового сигналу;
- зміною масштабного коефіцієнта;
- наявністю зони захоплення;
- чутливістю лазерного гіроскопа до зовнішнього магнітного поля;
- впливом на показання температури навколишнього середовища та швидкості її зміни;
- чутливістю лазерного гіроскопа до прискорень та вібрацій основи.

При цьому перші два типи похибок можна пояснити впливом активного середовища, а саме: змінами прямого і зворотного розсіювання та коефіцієнта заломлення, які можуть бути викликані впливом температури.

Наявність зони захоплення відноситься до конструктивних недоліків існуючих лазерних гіроскопів, що виникає поблизу нуля вихідної характеристики. Зона захоплення не дає можливості реєструвати сигнал при невеликих кутових швидкостях через наявність зворотного розсіювання. При малих кутових швидкостях відмінність частот випромінювання у зустрічних напрямках є невеликою, при цьому відбувається синхронізація частот, через яку неможливо зареєструвати сигнал. Для подолання цього ефекту застосовують досить велику різницю частот зустрічних хвиль. Для цього використовують магнітооптичну та механічну частотні підставки або невзаємний елемент.

Зовнішнє магнітне поле впливає на роботу лазерного гіроскопа через кругову складову у поляризації зустрічних променів та через магнітооптичну чутливість відбиваючих елементів. Температура впливає через зміну коефіцієнтів заломлення відбиваючих елементів, через зміну розсіювання при температурній перебудові резонатора, а також через зміну внутрішніх механічних напруж конструкції лазерного гіроскопа. Прискорення та вібрації викликають зміну внутрішніх механічних напруж конструкції лазерного гіроскопа, що призводить до змін оптичних характеристик та певних збоїв в електронних блоках. Тобто величина похибки лазерного гіроскопа залежить від його параметрів та стабільності.

У загальному випадку для підвищення характеристик відомих лазерних гіроскопів необхідно вирішити задачу покращення стабілізації його параметрів, зокрема, стабілізації та зменшення зони захоплення, зменшення впливу коливань навколишнього середовища (температури, тиску та вологості) на точність вимірювань (Michelson et al., 1904).

3. Основні типи лазерних гіроскопів

Зараз найбільш широко застосовують лазерні гіроскопи трьох основних типів, що розрізняються способом побудови частотної підставки (попереднім розщепленням частот зустрічних хвиль лазера за відсутності обертання): вібраційної, зеєманівської та фарадеївської.

Вібраційна частотна підставка заснована на механічному реальному обертанні гіроскопа під впливом кутових вібрацій. Вона характеризується високою довготривалою стабільністю, дозволяє застосовувати резонатор з лінійною поляризацією випромінювання, що генерується та забезпечує максимально високу точність гіроскопів. Однак цей тип частотної підставки має істотний недолік — наявність рухомих механічних частин, які різко знижують стійкість гіроскопів до зовнішніх механічних та кліматичних впливів.

Зеєманівські та фарадеївські частотні підставки (магнітооптичні) засновані на штучному, електрично керованому розщепленні частот зустрічних хвиль у гіроскопі. Штучне обертання створюється за допомогою введення в резонатор невзаємного елемента. У разі зеєманівської частотної підставки невзаємним елементом є саме активне середовище — суміш газів гелію і неону. Невзаємність в кільцевому лазері забезпечується створенням кругової поляризації випромінювання за рахунок неплоскостності контуру резонатора і накладенням поздовжнього магнітного поля на активне середовище. У випадку фарадеївської частотної підставки невзаємність створюється шляхом введення в резонатор фарадеївської комірки. Параметри цих частотних підставок визначаються електричними сигналами, що подаються на невзаємні елементи, що, в свою чергу, забезпечує більшу гнучкість у управлінні частотною підставкою і в досягненні їх оптимальних значень. Найважливішою перевагою гіроскопів з цими підставками є відсутність будь-яких рухомих механічних частин і забезпечення високої стійкості до зовнішніх механічних та кліматичних впливів, недоліком — найгірша довготривала стабільність їх параметрів точності. Однак вдосконалення технологій виготовлення діелектричних дзеркал і покриттів, що просвічуються, дозволяє покращувати стабільність гіроскопів з механічною і магнітооптичною частотними підставками.

4. Порівняльна характеристика лазерного та механічного гіроскопів

Принцип роботи механічного гіроскопа можна проаналізувати на прикладі роторного гіроскопа (Рис. 2). Основою роторного гіроскопа є ротор, що насаджується на вісь, яка, в свою чергу, може вільно змінювати своє положення у просторі. Швидкість обертання гіроскопа значно перевищує швидкість повороту його вісі обертання. Основна властивість даного механічного гіроскопа полягає у здатності зберігати у просторі незмінний напрямок вісі обертання при відсутності впливу на нього моментів зовнішніх сил та ефективно чинити опір дії зовнішнім моментам сил. При цьому дана властивість визначається величиною кутової швидкості власного обертання роторного гіроскопа. Тобто даний механічний гіроскоп являє собою тверде тіло, що швидко обертається. Вісь обертання гіроскопа може вільно змінювати свою орієнтацію у просторі. Також під час роботи роторного гіроскопа швидкість обертання його центрального елемента значно перевищує обороти по інших вісях, завдяки чому гіроскоп може зберігати напрямок вісі обертання навіть при впливі на його корпус зовнішніх сил. Слід зазначити, що при переміщенні механічного гіроскопу спостерігається ефект опору (Angell et al., 1983).



Рис. 2. Механічний гіроскоп

Роторні механічні гіроскопи, так само, як і лазерні гіроскопи, мають досить широке застосування у різних сферах науки та техніки (Beliveau et al., 1963). Вони застосовуються в якості складових частин навігаційних систем, використовуються як стабілізуючі елементи для різноманітних механізмів, зокрема, для стабілізації та контролю орієнтації різних космічних апаратів. Так механічні гіроскопи дозволяють аналізувати рух літака у просторі за відсутності орієнтирів. На даний момент механічні гіроскопи по точності перевершують лазерні гіроскопи, але в механічних гіроскопах присутні механічні деталі, що є досить незручним для вирішення багатьох задач. Також механічний гіроскоп за вартістю та надійністю поступається лазерному гіроскопу.

Також варто зауважити, що лазерні гіроскопи мають певні переваги у порівнянні із електромеханічними, які мають дуже важливе значення при вирішенні численних практичних завдань. Так, для конструкторів систем управління важливу роль грає спосіб, яким саме отримуються вихідні дані з гіроскопів та вигляд отриманих даних. Саме лазерний гіроскоп дає змогу отримувати на виході дуже зручні для управління сигнали, наприклад, у вигляді послідовності електричних імпульсів, полярність яких визначається напрямком повороту лазерного гіроскопа. При цьому число поодиноких імпульсів пропорційно малим фіксованим приростам кута повороту (наприклад, однієї секунди дуги). Також слід зауважити, що повний кут повороту лазерного гіроскопа знаходиться за загальною кількістю імпульсів.

5. Передумови розвитку лазерних гіроскопів

У наш час із потужним розвитком науки та техніки гіроскопи є незамінною складовою для систем інерціальної навігації, а саме: для навігації літаків, ракет, є обов'язковою складовою для підтримки рівноваги безпілотників.

Розмір гіроскопа може бути від декількох сантиметрів до декількох метрів. При цьому менші за розміром та точністю лазерні гіроскопи використовують у мобільних телефонах. Великі лазерні гіроскопи використовуються для вимірювання коливань земної кори, тобто для прогнозування землетрусів.

На даний момент найточніший у світі лазерний гіроскоп є гіроскоп, що побудований в геодезичній обсерваторії Ветцель Мюнхенського технічного університету та має периметр 16 м. Він фіксує найменші зміни проекції кутової швид-

кості обертання Землі на вхідну вісь лазерного гіроскопа. Найменшим лазерним гіроскопом є гіроскоп КМ-2, який має периметр всього 2 см та призначений для вимірювання кутової швидкості ротора, що характеризується досить швидким обертанням.

Слід зазначити, що чутливість лазерного гіроскопа пропорційна площі поверхні, що обмежена променями лазера.

На даний час у багатьох країнах проводяться інтенсивні дослідження властивостей лазерного гіроскопа. Основою для таких досліджень є прогнозовані унікальні характеристики лазерного гіроскопа, які за розрахунками складають (Богданов и др., 1972):

- а) поріг чутливості до 10^{-9} рад/сек;
- б) точність вимірювання до 10^{-6} та вище;
- в) швидкість відходу — одиниці секунд дуги за добу.

На даний час постає задача виключення впливу змін умов навколишнього середовища на точність лазерних гіроскопів. Тобто нам необхідно суттєво підвищити точність лазерних гіроскопічних вимірювань у техніці, а саме при стабілізації положення літальних апаратів у просторі, при керуванні рухомими об'єктами різного типу, що підлягають дослідженню, за рахунок виключення впливу метеофакторів (атмосферного тиску, температури середовища по лінії візування, вологості і ін.) на точність вимірювань (Statz et al., 1985).

Висновки

В даній статті було розглянуто структуру, основні характеристики та сфери застосування лазерних гіроскопів. Були наведені основні переваги лазерних гіроскопів, а саме: цифровий вихідний сигнал, малий час готовності та відсутність рухомих частин. Також були проаналізовані і недоліки сучасних лазерних гіроскопів, такі як: дрейф нульового сигналу, зміна масштабного коефіцієнта, наявність зони захоплення, чутливість лазерного гіроскопа до зовнішнього магнітного поля, вплив на показання температури навколишнього середовища, чутливість лазерного гіроскопа до прискорень та вібрацій основи.

Було наголошено на тому, що для подолання основного конструктивного недоліку лазерного гіроскопа — зони захоплення застосовуються частотні підставки. При цьому лазерні гіроскопи розрізняються між собою способом побудови частотної підставки. Частотні підставки використовуються трьох типів: вібраційні, зеєманівські та фарадєєвські.

У статті було розглянуто структуру та принцип роботи механічних гіроскопів, описані їх переваги та недоліки. Було проведено порівняльний аналіз механічного та лазерного гіроскопів.

Також були окреслені основні перспективи розвитку лазерних гіроскопів та спрогнозовані унікальні характеристики лазерного гіроскопа, а саме: точність вимірювання до 10^{-6} і вище, поріг чутливості до 10^{-9} рад/сек та швидкість відходу — одиниці секунд дуги за добу. Слід зазначити, що покращення характеристик лазерних гіроскопів значно сприяє покращенню контролю над рухом та орієнтацією БПЛА, що, в свою чергу, дає змогу дронам давати продукцію (знімки) більш високої якості, тобто давати знімки з більшою точністю. Ця проблема є дуже важливою, оскільки на даний час одним із недоліків дронів є невиконання у повній мірі умов топографічної точності при складанні топографічних карт великого масштабу через неточну прив'язку БПЛА на місцевості, що ускладнює пошук нафти, газу, корисних копалин та проведення моніторингу стану лісів та сільськогосподарських територій (Statz et al., 1985; Popov et al., 2017; Alpert et al., 2019; Alpert, 2020).

На сьогоднішній день одним із найважливіших та актуальних завдань залишається створення лазерних гіроскопів із більшою точністю вимірювання та порогом чутливості. Тому на даний час постає задача виключення впливу коливань умов навколишнього середовища на точність лазерних гіроскопів. Тобто виникає необхідність суттєво підвищити точність лазерних гіроскопічних вимірювань у техніці, а саме при стабілізації положення літальних апаратів у просторі, при керуванні рухомими об'єктами різного типу, за рахунок виключення впливу метеофакторів (атмосферного тиску, температури середовища, вологості і ін.) на точність вимірювань.

Література

- Основные вопросы разработки лазерного гироскопа / В. В. Богданов и др. Известия ЛЭТИ. 1972. Выпуск 101.
- Alpert Sofia. A new approach to applying the discount rule in hyperspectral satellite image classification. *Management of Development of Complex Systems*. 2020. Vol. 43. P. 76–82. [dx.doi.org/10.32347/2412-9933.2020.43.76-82](https://doi.org/10.32347/2412-9933.2020.43.76-82).
- Alpert M. I., Alpert S. I. A new approach to the application of Jaccard coefficient and Cosine similarity in Hyperspectral Image Classification. Proceedings of the XVIII-th International Conference on Geoinformatics — Theoretical and Applied Aspects. Kiev, May 2019. P. 1–5.
- Anderson R., Bilger H. R., Stedman G. E. Sagnac effect: A century of Earth-rotated interferometers. *Am. J. Phys.* 1994. Vol. 62, № 11. P. 975–985. [doi:10.1119/1.17656](https://doi.org/10.1119/1.17656).
- Angell J., Terry S., Barth P. Silicon Micromechanical Devices. *Sci. Am.* 1983. Vol. 248, № 4. P. 44–55. [doi:10.1038/scientificamerican0483-4](https://doi.org/10.1038/scientificamerican0483-4).
- Beliveau A., Spencer G. T., Thomas K. A., Roberson S. L. Evaluation of MEMS capacitive accelerometers. *IEEE Design & Test of Computers*. 1999. Vol. 16, № 4. P. 48–56. [doi:10.1109/54.808209](https://doi.org/10.1109/54.808209).
- Horowitz, Michael C. Do Emerging Military Technologies Matter for International Politics. *Annual Review of Political Science*. 2020. № 23. P. 385–400. [doi:10.1146/annurev-polisci-050718-032725](https://doi.org/10.1146/annurev-polisci-050718-032725).
- King A.D. Inertial Navigation — Forty Years of Evolution. *GEC Review. General Electric Company*. 1998. Vol. 13, № 3. P. 140–149.
- Macek W. M., Davis D. T. M. Rotation rate sensing with traveling-wave ring lasers. *Applied Physics Letters. AIP Publishing*. 1963. Vol. 2, № 3. P. 67–68. [doi:10.1063/1.1753778](https://doi.org/10.1063/1.1753778).
- Michelson A. A. Relative Motion of Earth and Aether. *Philosophical Magazine*. 1904. Vol. 8, № 48. P. 71–719. [doi:10.1080/14786440409463244](https://doi.org/10.1080/14786440409463244).
- Popov M. A., Alpert S. I., Podorvan V. N. Satellite image classification method using the Dempster-Shafer approach. *Izvestiya, atmospheric and oceanic. Physics*. 2017. Vol. 53, № 9. P. 1112–1122. [doi: 10.1134/s0001433817090250](https://doi.org/10.1134/s0001433817090250).
- Statz Hermann, Dorschner T. A., Holz M., Smith I. W. The multioscillator ring lasergyroscope. *Laser handbook*. Elsevier (North-Holland Pub. Co). 1985. P. 229–332.

References

- Alpert, M. I., Alpert, S. I. (2019, May). A new approach to the application of Jaccard coefficient and Cosine similarity in Hyperspectral Image Classification. Proceedings of the XVIII-th International Conference on Geoinformatics — Theoretical and Applied Aspects, 1–5, Kiev.
- Alpert, Sofia. (2020). A new approach to applying the discount rule in hyperspectral satellite image classification. *Management of Development of Complex Systems*, 43, 76–82. [dx.doi.org/10.32347/2412-9933.2020.43.76-82](https://doi.org/10.32347/2412-9933.2020.43.76-82).
- Anderson, R., Bilger, H. R., Stedman, G. E. (1994). Sagnac effect: A century of Earth-rotated interferometers. *Am. J. Phys.*, 62 (11), 975–985. [doi:10.1119/1.17656](https://doi.org/10.1119/1.17656).
- Angell, J. B., Terry, S. C., Barth, P. W. (1983). Silicon Micromechanical Devices. *Sci. Am.*, 248 (4), 44–55. [doi:10.1038/scientificamerican0483-4](https://doi.org/10.1038/scientificamerican0483-4).
- Beliveau, A., Spencer, G. T., Thomas, K. A., Roberson, S. L. (1999). Evaluation of MEMS capacitive accelerometers. *IEEE Design & Test of Computers*, 16 (4), 48–56. [doi:10.1109/54.808209](https://doi.org/10.1109/54.808209).
- Bogdanov, V. V. (1972). The main issues of the development of laser gyro. News of LETI. Issue 101.
- Horowitz, Michael C. (2020). Do Emerging Military Technologies Matter for International Politics. *Annual Review of Political Science*, 23, 385–400. [doi:10.1146/annurev-polisci-050718-032725](https://doi.org/10.1146/annurev-polisci-050718-032725).
- King, A. D. (1998). Inertial Navigation — Forty Years of Evolution. *GEC Review. General Electric Company*, 13 (3), 140–149.
- Macek, W. M., Davis, D. T. M. (1963). Rotation rate sensing with traveling-wave ring lasers. *Applied Physics Letters. AIP Publishing*, 2 (3), 67–68. [doi:10.1063/1.1753778](https://doi.org/10.1063/1.1753778).
- Michelson, A. A. (1904). Relative Motion of Earth and Aether. *Philosophical Magazine*, 8 (48), 716–719. [doi:10.1080/14786440409463244](https://doi.org/10.1080/14786440409463244).
- Popov, M. A., Alpert, S. I., Podorvan, V. N. (2017). Satellite image classification method using the Dempster-Shafer approach. *Izvestiya, atmospheric and oceanic. Physics*, 53 (9), 1112–1122. [doi: 10.1134/s0001433817090250](https://doi.org/10.1134/s0001433817090250).
- Statz, Hermann, Dorschner, T. A., Holz, M., Smith, I. W. (1985). The multioscillator ring lasergyroscope. *Laser handbook*. Elsevier (North-Holland Pub. Co), 229–332.

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЛАЗЕРНЫХ ГИРОСКОПОВ

С. І. Альперт

ГУ “Научный центр аэрокосмических исследований Земли ИГН НАН Украины”, ул. Олеся Гончара 55-Б, Киев 01054, Украина

В настоящее время беспилотные летательные аппараты (дроны) применяются для решения многочисленных задач дистанционного зондирования Земли. Они дают новые возможности для проведения экологического мониторинга и обеспечивают изображения с очень высоким разрешением.

Беспилотные летательные аппараты применяются для решения многочисленных сельскохозяйственных задач. Они дают детальную картину полей. Беспилотные летательные аппараты используются для увеличения производства сельскохозяйственных культур. С постоянным усовершенствованием технологий снимки сельскохозяйственных земель должны быть высшего качества.

Цифровые изображения, полученные беспилотными летательными аппаратами (дронами), могут быть использованы в лесном хозяйстве, они используются для мониторинга окружающей среды, оценки состояния растений и анализа стихийных бедствий. Беспилотные летательные аппараты также используются для добычи полезных ископаемых, они применяются для картографирования участков месторождений полезных ископаемых, поиска нефти и газа, в топографической съемке месторождений.

Лазерный гироскоп является важным компонентом системы управления полетом дронов. Лазерные гироскопы обеспечивают контроль ориентации дрона и дают необходимую навигационную информацию для центральных систем контроля полетом. Лазерные гироскопы предоставляют навигационную информацию полетному контролеру, что делает полет дронов более легким и безопасным. Лазерный гироскоп является одним из важнейших компонентов, позволяющих дрону летать плавно даже при сильном ветре. Плавность полета позволяет получать изображения с высокой точностью.

В настоящее время основной функцией гироскопических технологий является усовершенствование летных возможностей беспилотных

летательных аппаратов. Описаны структура и основные характеристики лазерных гироскопов. Было отмечено, что лазерный гироскоп работает по принципу эффекта Саньяка. Эффект Саньяка - это явление, встречающееся в интерферометрии и вызываемое вращением. Описаны основные преимущества и недостатки лазерных гироскопов. Был проведен сравнительный анализ механического и лазерного гироскопов. Также было отмечено, что лазерные гироскопы применяются в различных областях, таких как: инерциальные навигационные системы, самолеты, корабли, беспилотные летательные аппараты (дроны) и спутники. В настоящее время лазерная техника развивается дальше. Имеются все предпосылки для повышения точности и других технических характеристик лазерных гироскопов.

Ключевые слова: лазерный гироскоп, эффект Саньяка, беспилотный летательный аппарат, дистанционное зондирование Земли

MAIN CHARACTERISTICS AND PERSPECTIVES OF DEVELOPMENT OF LASER GYROSCOPES

S. I. Alpert

Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth of the Institute of Geological Science of the National Academy of Sciences of Ukraine, O. 55-B Gonchar str., Kyiv 01054, Ukraine

Nowadays unmanned aerial vehicles (drones) are applied for solution numerous remote sensing tasks. They give a new opportunities for conducting environmental monitoring and give images with a very high resolution.

Unmanned aerial vehicles are applied for solution numerous agricultural problems. They give a detail picture of fields. Unmanned aerial vehicles are used to help increase crop production. With technology constantly improving, imaging of the crops will need to improve as well.

Digital images obtained by unmanned aerial vehicles (drones) can be used in forestry, they are used for environmental monitoring, plant health assessment and analysis of natural disasters. Unmanned aerial vehicles are also used for mining, they are applied for mapping deposit sites, exploring for oil and gas, surveying mines.

Laser gyroscope is an essential component of a drones flight control system. Laser gyroscopes provides orientation control of drone and essential navigation information to the central flight control systems. Laser gyroscopes provide navigation information to the flight controller, which make drones easier and safer to fly. Laser gyroscope is one of the most important components, allowing the drone to fly smooth even in strong winds. The smooth flight capabilities allows us to get images with high precision.

Nowadays the main function of gyroscope technologies is to improve the unmanned aerial vehicles flight capabilities. It was described a structure and main characteristics of laser gyroscopes. It was noted, that laser gyroscope is operated on the principle of the Sagnac effect. Sagnac effect is a phenomenon encountered in interferometry that is elicited by rotation. It were described main advantages and disadvantages of laser gyroscopes. A comparative analysis of mechanical and laser gyroscopes was carried out too.

It also was noted, that laser gyroscopes are applied in different areas, such as: inertial navigation systems, aircraft, ships, unmanned aerial vehicles (drones) and satellites. Nowadays laser technology is developed further. There are all prerequisites for improving the precision and other technical characteristics of laser gyroscopes.

Keywords: laser gyroscope, Sagnac effect, unmanned aerial vehicle, remote sensing

Рукопис статті отримано 13.01.2021