

## Вступ

Термін LIDAR (від англ. Light Detection and Ranging) відноситься до систем радіолокації, які працюють в оптичному діапазоні і використовують в якості джерела випромінювання лазер. Часто в зарубіжних джерелах можна зустріти аналогічні терміни - LADAR (Laser Detection and Ranging) і Laser Radar. У мобільних наземних робототехнічних комплексах і безпілотних літальних апаратах (БПЛА) ця технологія відіграє дуже важливу роль: вона використовується для автоматичної побудови тривимірної карти (сцени) навколишнього простору і просторової орієнтації апарату. В загальному випадку систем LIDAR містять такі ключові елементи, що визначають принцип роботи системи: джерело фотонів (найчастіше це лазер); детектор фотонів; тактуючий ланцюг; оптична прийомопередавальна частина [1].

Застосування засобів захисту рослин за допомогою обприскувачів є найбільш широко використовуваною процедурою захисту сільськогосподарських культур від шкідників і хвороб. Використання цього типу методології є дорогим і трудомістким. Крім того, інформація про хмари пестицидів не вирішена в часі, об'ємна візуалізація хмари неможлива, і на ефективність впливають метеорологічні умови. Крім того, через велике розмаїття сільськогосподарських і метеорологічних умов важко точно оцінити реальну небезпеку розпилення, пов'язану з кожною технологією нанесення. В результаті актуальним стає пошуку альтернативних методів, які можуть використовуватися як в лабораторії, так і в аеродинамічних трубах або в польових умовах. Використання оптичних систем, таких як лідар (виявлення світла і ранжування), стало одним з найбільш оптимальних варіантів.

## 1. Лідарні системи інфрачервоного діапазону довжин хвиль

### 1.1 Безпечний для очей оператора діапазон випромінювання лідарної системи

Лазерні скануючі далекоміри працюють на різних довжинах хвиль, але частіше за інших використовуються наступні:

- $\lambda = 355\text{nm}$ . УФ-лідари, що відповідають третьої гармоніки твердотільного лазера Nd: YAG.
- $\lambda = 523\text{nm}$ . Видиме випромінювання.
- $\lambda = 905\text{nm}$ . Зазвичай застосовується в лідарній геометрії, яка відповідає лазерному діоду InGaAs.
- $\lambda = 1064\text{nm}$ . ІЧ-випромінювання, що генерується лазером Nd: YAG.
- $\lambda = 1540\text{nm}$ . Зазвичай використовується в безпечних для очей системах.

Вибір довжини хвилі лазерного випромінювача залежить від цілого ряду чинників: відбиваючих властивостей сканованих об'єктів; характеристик навколишнього середовища; чутливості використовуваного детектора; необхідного ступеня безпеки для очей; вимог до конструкції пристрою.

Сканування лідарних вимірів в міських районах стає більш важливим з причин, пов'язаних з впливом аерозольних викидів на клімат. Зокрема, скануючі лідари зворотнього розсіювання пропонують можливість виявляти і відображати дорожні шлейфи потенційно небезпечних аерозолів. Через те, що міські райони переповнені людьми, будинками і повітряним рухом, безпека очей є обов'язковим фактором.

Ніяка оптична довжина хвилі не є невід'ємно безпечною для очей, але деякі довжини хвиль безпечніші, ніж інші. Це відображено на рисунку 1.1.

Він показує максимальну енергію зору для імпульсного лазера як функцію довжини хвилі променю. На діаграмі показано, що довжини хвиль

між 1,5 і 1,8 мкм дозволяють передавати найвищу допустиму енергію. Це пов'язано з об'ємною поглинаючою здатністю рідини очей.

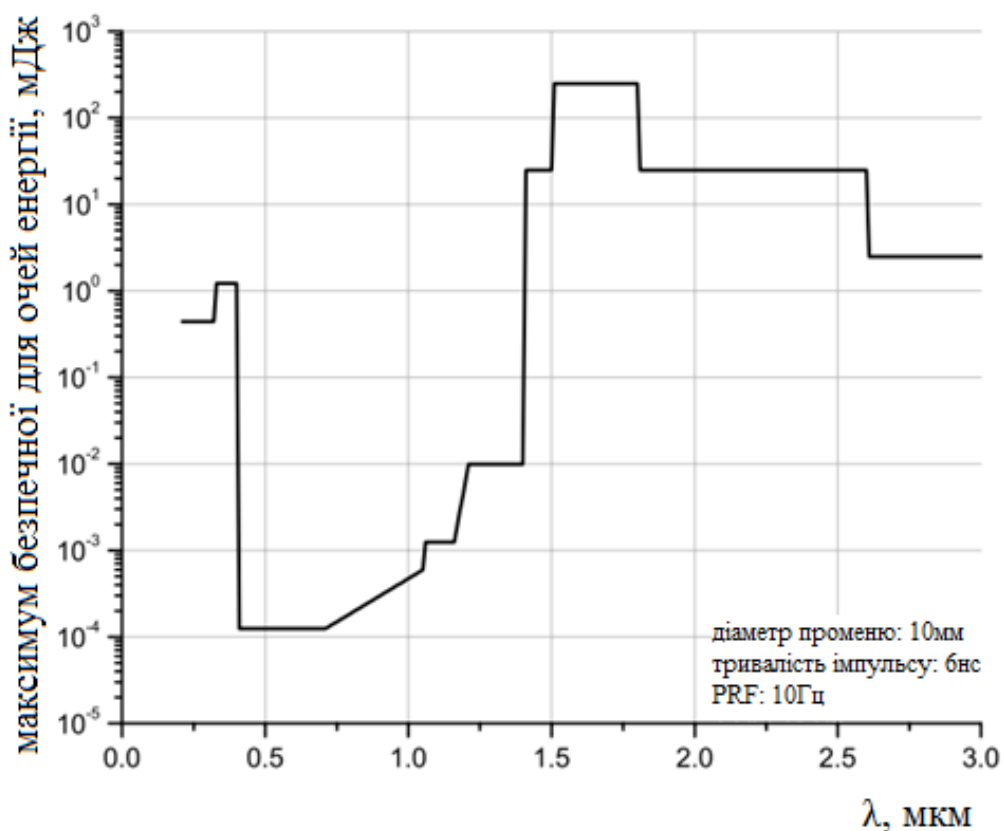


Рисунок 1.1 – Максимальна безпечна для очей енергія в залежності від довжини хвилі для пучка діаметром 10мм, імпульсом тривалістю 6нс і частотою повторення імпульсів 10 Гц

У таблиці 1.1 показано, що для кожної досліджуваної довжини хвилі на декількох частотах повторення імпульсів (PRF) розширення лазерного променя, необхідне для того, щоб система була безпечною для очей. Відправною точкою для цього є рівні максимально допустимої експозиції (МДЕ). Наведені значення PRF враховують, що система повинна мати тимчасовий дозвіл більше 1с, тому потрібно мінімум PRF 1Гц. Чим вище PRF, тим вище тимчасовий дозвіл, хоча рівень безпеки очей буде знижений.

При 905нм безпека очей досягається тільки для розширень пучка більше 50мм (таблиця 1.1). При 1064 нм значення МДЕ досягаються з розширеннями пучка, дещо меншими, ніж необхідні при 905 нм. Це пов'язано

з більш високим рівнем безпеки очей на цій довжині хвилі і, незважаючи на випромінювання більш високих енергій імпульсу. При довжині хвилі 1064 нм у всіх випадках потрібні діаметри променів більше 50 мм, за винятком низькоенергетичних викидів і помірних значень PRF (25 мкДж і 1-10 Гц). Розширення пучка, необхідні при 1,54мкм, знаходяться на один і два порядки нижче, ніж розраховані для 905 і 1064 нм [2].

Таблиця 1.1 – Необхідні діаметри променя (в мм) при декількох частотах повторення для досліджуваних довжин хвиль та енергій імпульсів

Довжина хвилі	905нм			1064нм			1,5мкм		
Енергія імпульса, мкДж	15	75	300	25	100	500	50	200	1000
1Гц	51	115	230	34	67	151	0,8	1,6	3,6
10Гц	69	153	307	45	90	201	2,5	5	11
100Гц	91	204	409	60	120	268	8	16	36

Виходячи з вищенаведених результатів, найбільш оптимальна довжина хвилі становила 1,54 мкм. Це дозволяє випускати необхідні імпульсні енергії і в той же час задовольняти вимогам компактного дизайну, зазначеним спочатку. Крім переваг в плані безпеки очей, на цій довжині хвилі сонячна радіація приблизно на порядок нижче, ніж при 1064 нм, а сигнал Релея малий. Один з недоліків, який слід згадати, полягає в тому, що при використанні InGaAs у якості генераторів випромінювання на довжині хвилі 1,54мкм, мають максимальний діаметр всього 200мкм. Ці невеликі розміри обмежують поле зору і пред'являють більш високі вимоги до оптико-механічного дизайну. Незважаючи на це, випромінювання довжини хвилі 1,54мкм являє собою в даний час одну з найбільш перспективних альтернатив для розробки безпечних для очей лідарних систем [3].

## 1.2 Типи раманівських лідарів

### 1.2.1 Раманівський рухомий безпечний для очей аерозольний лідар

У 2004 році були представлені конструктивні особливості та перші спостереження від нової лідарної системи пружного зворотного розсіювання на довжині хвилі 1543нм. Передавач використовує вимушене комбінаційне розсіювання в метані високого тиску для перетворення основного випромінювання Nd: YAG з допомогою першого стоксового зсуву. Гамма-осередок з перетворенням довжини хвилі характеризується багатопрохідною роботою і внутрішніми вентиляторами. На відміну від попередніх лідарних розробок, які використовували комбінаційне розсіювання в метані, пучок накачування не може сфокусуватись в даній конфігурації. Ця функція попереджує оптичний пробій газу всередині осередку. Крім того газова комірка являє собою ін'єкцію, яку висіває діод для підвищення ефективності перетворення і якості променя. Приймач використовує телескоп діаметром 40,6 см і лавинний фотодіод InGaAs на 200 мкм. Система може працювати в двоххвильовому режимі (1064 та 1543нм одночасно) для порівняння або в повністю безпечному для очей режимі. Система здатна передавати відносно високі імпульси енергії (понад 200мДж/імпульс при 10Гц) у порівнянні з іншими системами і все-таки залишається в безпеці на всіх діапазонах. Відображаються дані аерозольного зворотного розсіювання з вертикального і горизонтального періодів [4].

### 1.2.2 Раман-рухомий безпечний для очей аерозольний лідар (REAL)

REAL (RAMAN-SHIFTED EYE-SAFE AEROSOL LIDAR) виробляє високі співвідношення сигнал-шум аерозолів зворотного розсіювання з окремих лазерних імпульсів і забезпечує високу роздільну здатність (3 м) даних. Тому REAL відрізняється від існуючих мікроімпульсних та когерентних доплерівських лідарних систем. Такою системою можна безпечно передати більше 1Дж на імпульс в цій області. Діаметр променя, що передається системою, приблизно 5см у вихідному отворі.

REAL використовує мультипрохідну газову клітку, яка містить 10 атмосфер чистого метану для перетворення 1,0мкм довжини хвилі Nd:YAG лазерного випромінювання до безпечніших 1,54 мкм довжини хвилі за допомогою стимульованого комбінованого розсіювання. Хоча REAL і використовує Раманівське розсіювання в його передавачі, яке впливає з його назви, це не "Раманівський лідар", який виявляє непружне розсіювання з водяної пари в атмосфері. Для порівняння, REAL використовує Раманівське розсіювання в метановій комірці передавача для генерування світла в області довжини хвилі з максимально допустимою експозицією. REAL виявляє еластичне розсіяне світло від малих частинок в атмосфері. Тому REAL – це не "Раманівський лідар" в традиційному сенсі.

Для того, щоб переконатися в тому, що для вимірювання дрейфу аерозолів як в сільськогосподарській промисловості, так і в міських місцевостях найкраще підходять лідарні системи з довжиною хвилі випромінювача 1543нм (у тому числі і Раманівський з'ємний аерозольний лідар), нижче приведені розрахунки характеристик лідарної системи даної довжини хвиль і їх порівняння з характеристиками для довжин хвиль 905нм та 1064нм [5].

### 1.3 Технічні характеристики прототипу лідарної системи

На рисунку 1.2 показана оптико-механічна конфігурація прототипу лідарної системи.

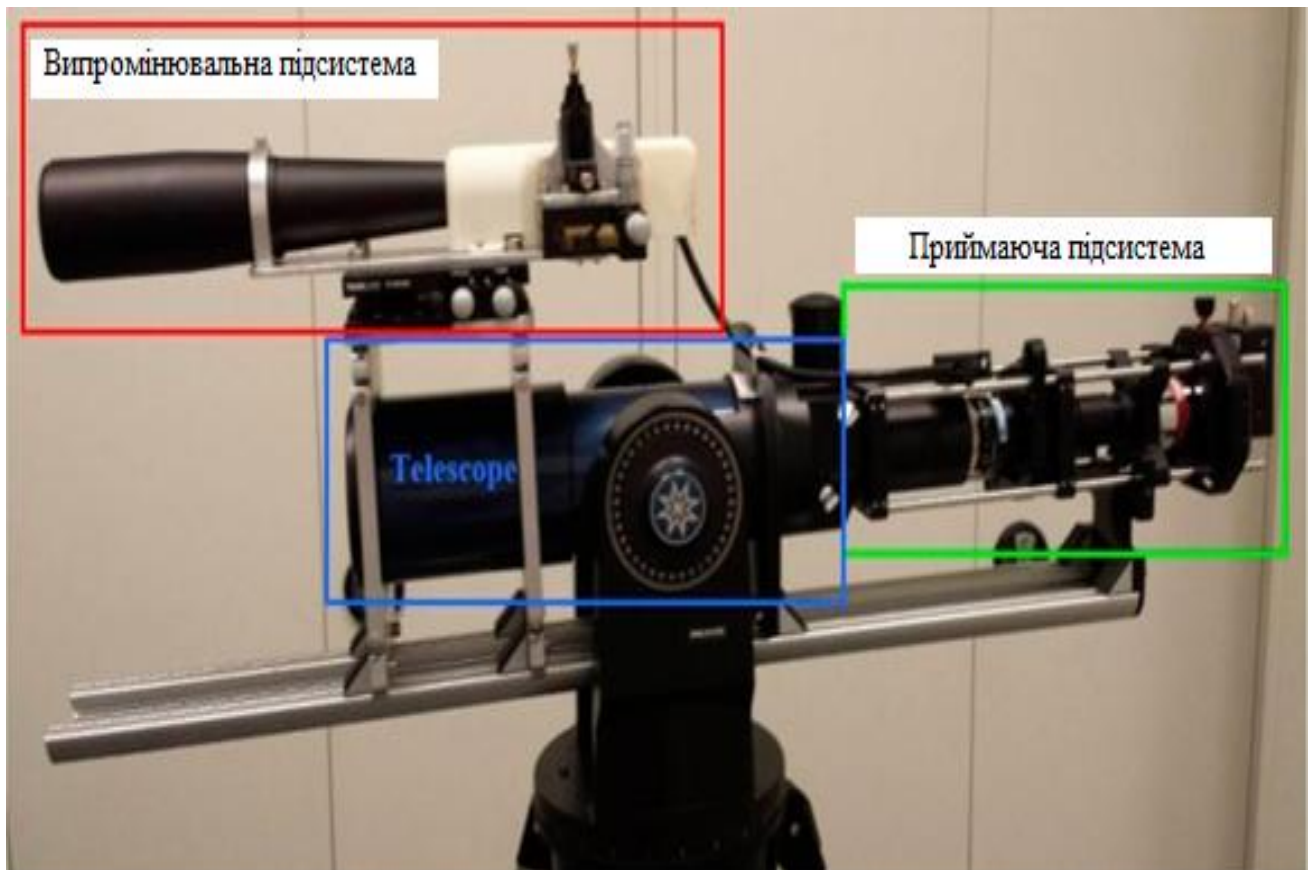


Рисунок 1.2 – Оптико-механічна конфігурація прототипу лідарної системи

#### 1.3.1 Випромінювальна система

Існують різні варіанти генерації імпульсної лазерної енергії при 1,54мкм: вимушене комбінаційне розсіювання (ВКР), оптичні параметричні осцилятори (ОПО), леговані ербієм скляні лазери і лазерні діоди InGaAsP. У

той час як напівпровідникові діоди представляють собою найпростіше і економічне рішення, їх мала потужність обмежує їх застосування липовими токометрами, енергетичні вимоги яких не дуже вимогливі ( $\sim 1$  мкДж). Інші недоліки лазерних діодів включають їх високу дивергенцію і низьку спектральну чистоту.

Скляні лазери, леговані ербієм у вигляді стрижнів або оптичних волокон, безпосередньо випромінюють імпульси на довжині хвилі 1,54 мкм. У цьому проекті було вирішено вибрати джерело такого типу з його основними перевагами простоти і вартості в порівнянні з ОПО. Їх імпульсні енергії варіюються від декількох мікроджоулів до 40 мДж. Ці значення нижче, ніж значення, отримані за допомогою SRS або ОРО, але вони достатні для нашого застосування. Інші приклади лідарних систем на основі легованих ербієм скляних лазерів представлені в [3; 6-9].

Як джерело випромінювання використовувалася модель лазерного скла, легована ербієм з енергією імпульсу 3 мДж при 1 543 нм. Ця модель дозволяє поєднувати короткі тривалості імпульсів ( $< 6$  нс) з низькими частотами повторення (обмежена з міркувань безпеки). Обраний блок дозволяє регулювати PRF від одиночних викидів до 10 Гц.

Рисунок 1.3 показує відносне положення лазерного передавача і розширювача пучка. Лазерний блок утримується на місці за допомогою мініатюрної ступені трансляції XZ, функція якої полягає в тому, щоб відрегулювати положення випромінюваного пучка з оптичним входом розширювача променя. Цей ступінь трансляції, в свою чергу, утримується на місці за допомогою платформи аксесуарів тангажу і рискання, яка дозволяє кутовий вирівнювання лазерного променя щодо оптичної осі розширювача. Вся емісійна підсистема (лазерний передавач і розширювач пучка) утримується на місці платформою з високим навантаженням, яка дозволяє точно регулювати кут нахилу між осями оптичного випромінювання і прийому. Коефіцієнт перекриття (OVF – overlap factor) і діапазон, на якому досягається повна OVF, критично залежать від кута нахилу [10].



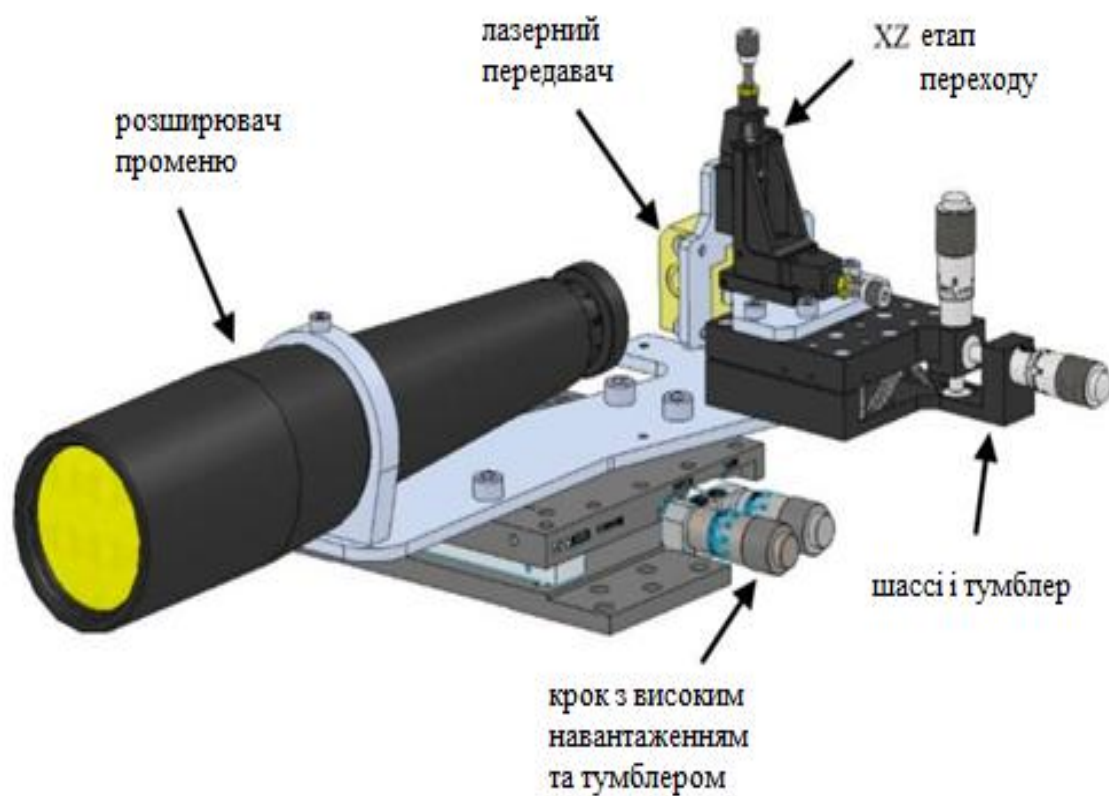


Рисунок 1.3 – CAD 3D-модель оптико-механічної емісійної підсистеми

В таблиці 1.2 показані технічні характеристики представленої системи

Таблиця 1.2 – Технічні характеристики системи випромінювання лідарної системи

Передавач	Лазер	Модель	Kigre™ МК-85
		Центральна довжина хвилі, $\lambda$	1543нм (лазер з ербієвого скла)
		Спектральна пропускна здатність	4,5нм
		Енергія імпульса, E0	3мДж
		Тривалість імпульса, $\tau$	6нс
		Частота повторення імпульсів, PRF	10Гц
	Розширювач променю	Діаметр вихідного променю	16мм
		Розширення променю	20x
		Розбіжність вихідного променю, $\theta$	210мкрад
Приймач	Телескоп	Модель	Meade™ ETX80
		Діаметр основного об'єктиву, d0	80мм
	Інтерференційний фільтр	Центральна довжина хвилі, $\lambda$	1530нм
		Повна ширина половини максимуму, $\Delta\lambda$	12нм
	APD модуль	Модель	Thorlabs™ APD110C
		Активна площа діаметру, dD	0,2мм
		Внутрішня чутливість, R <sub>io</sub>	0,9 А/Вт(1500нм)
		Шумовий еквівалент потужності, NEP <sub>m</sub>	0,46пВт/Гц <sup>1/2</sup>
		APD накопичення, M	10
		Трансімпедансне посилення, G	10 <sup>5</sup> В/А
		Пропускна здатність виходу (ЗдБ), BN	DC-50МГц
	Цифровий перетворювач	Модель	GaGe™ CompuScope 12502
		Вибірка	500 МС/с
		Роздільна здатність	12 біт

### 1.3.2 Приймальна система

Оптоелектронний приймач являє собою модель APD110C (Thorlabs, Newton, NY, USA), яка включає в себе фотодіод InGaAsP APD з характеристичною чутливістю  $0,9\text{A/Вт}$  ( $M = 10$ ) і підсилювач трансїмпедансу з коефіцієнтом посилення  $10^5\text{ В/А}$ . Світлочутлива поверхня APD має діаметр всього  $200\text{ мкм}$ , і тому для правильного позиціонування потрібне використання точної трансляції XY (рисунок 1.3). Основні характеристики модуля приймача показані в таблиці 1.2 [11].

Схема оптики приймача прототипу лідара показана на рисунку 1.4.

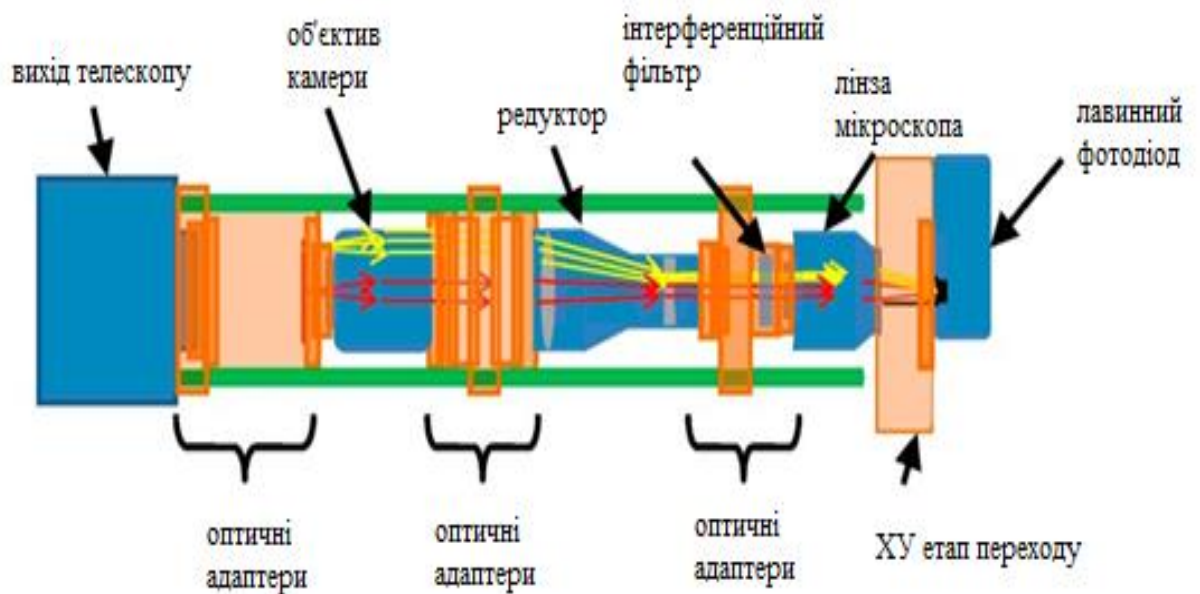


Рисунок 1.4 – Лідарна світлочутлива оптична система

#### 1.4 Практичне використання лідарних систем

На рисунку 1.5 показана типова установка лідарної системи під час дослідження дрейфу розпилення. У цьому тесті розбризкування здійснювалось повітряним розпилювачем, який оброблював виноградник (фон), тоді як лідарна система розміщувалася на відстані 80м (на передньому плані). Лазер був спрямований перпендикулярно саду і над ним, щоб запобігти спотворенню сигналів деревами. Зворотний розсіяний сигнал через взаємодію з хмарою дрейфу розпилення виявляється оптоелектронним приймачем і відправляється на ПК, щоб сигнал відображався в реальному часі [12].

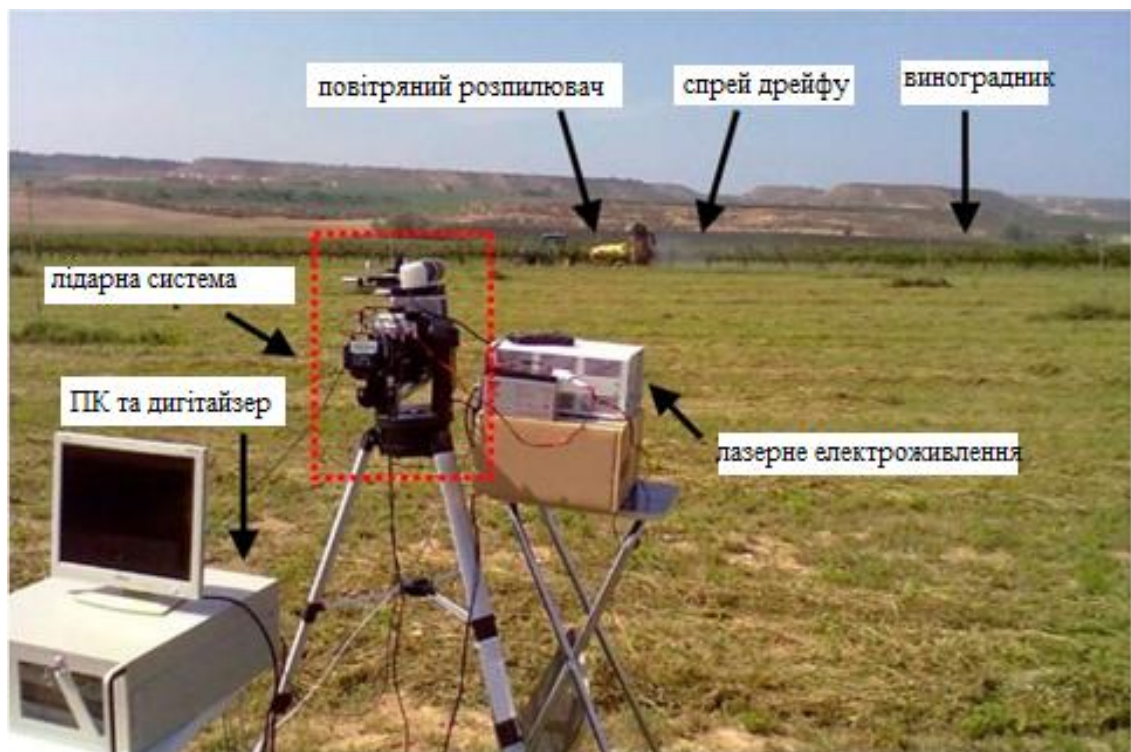


Рисунок 1.5 – Виявлення пестицидних хмар за допомогою лідарної системи

На рисунку 1.6 представлена система Wind Tracer компанії Lockheed Martin, яка використовується для аналізу аерозольних розпилювань біля аеропорту Мюнхена [13].



Рисунок 1.6 – Практичне використання лідарної системи для моніторингу стану забруднення аеропорту

На рисунку 1.7 представлена картина міського ландшафту, зробленої за допомогою лідарної системи фірми Textron [13]

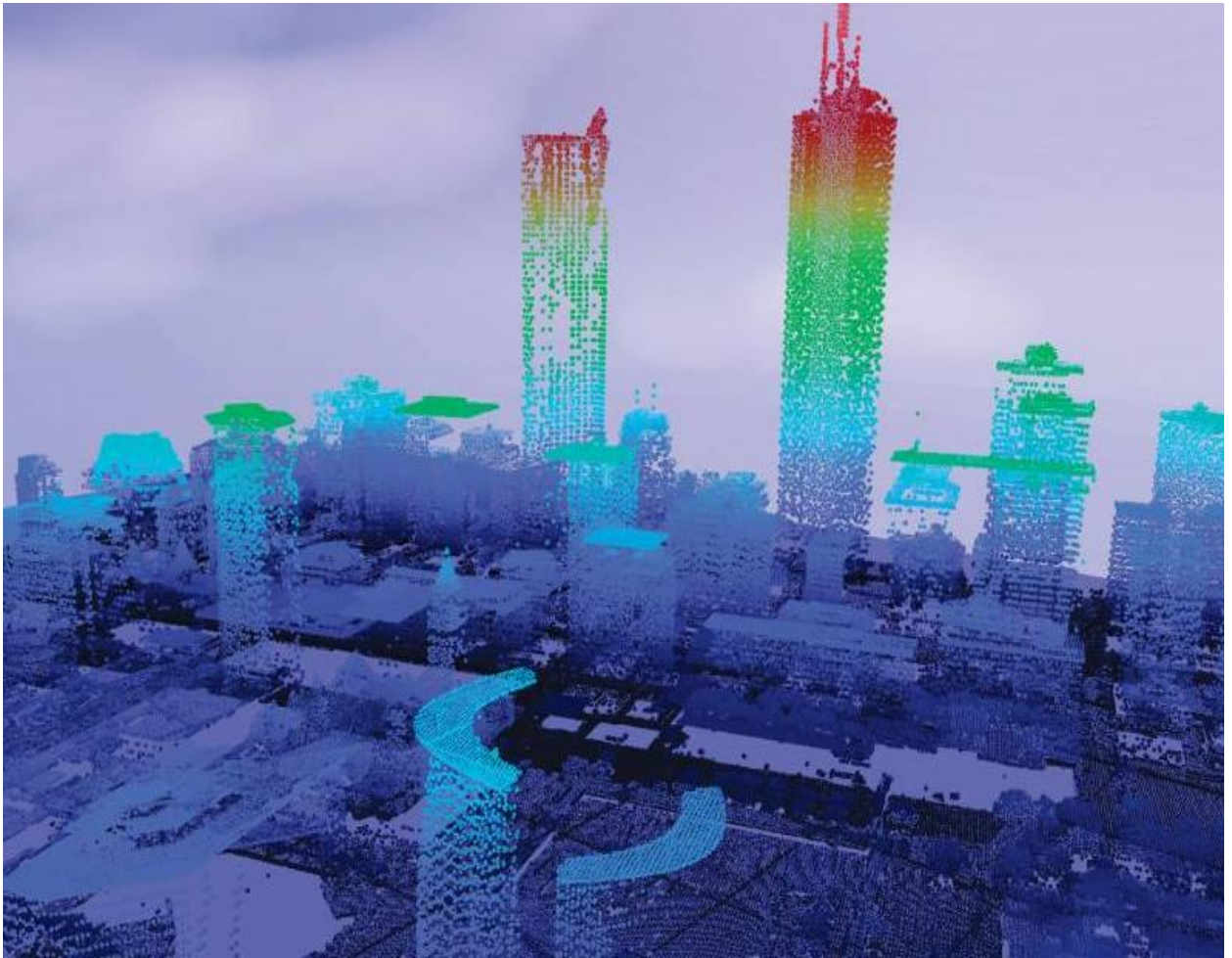
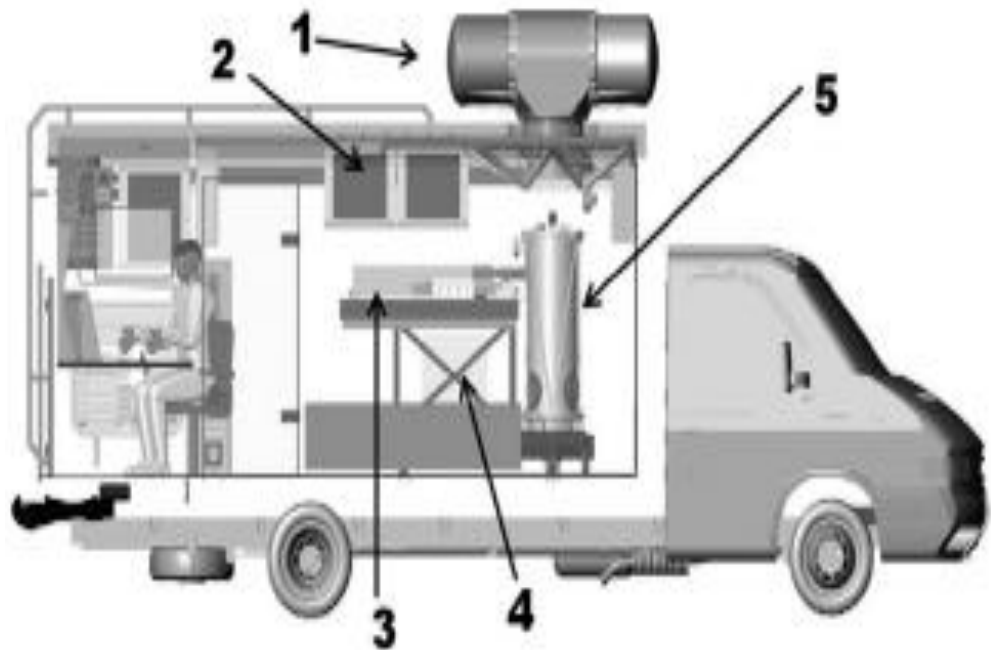


Рисунок 1.7 – Контроль стану міського ландшафту за допомогою лідарної системи

Окрім стаціонарних лідарних систем можливе використання лідарних систем в мобільному варіанті. На рисунку 1.8 представлено мобільний лідарний комплекс [11].



- 1- сканер;
- 2- система керування вимірювальною апаратурою;
- 3- аерозольний лідар;
- 4- антивібраційний оптичний стіл;
- 5- телескоп

Рисунок 1.8 – Мобільний лідарний комплекс

Але, наразі існує ряд проблем використання лідарних систем. В першу чергу – це створення оптимального за оптико-фізичними властивостями джерела випромінювання та спрощення схем реєстрації отриманої інформації [11-13].

## Перелік посилань

1. Gregorio E., Rosell-Polo J.R., Sanz R., Rocadenbosch F., Solanelles F., Garcerá C., Chueca P., Arnó J., del Moral I., Masip J., et al. LIDAR as an alternative to passive collectors to measure pesticide spray drift. *Atmos. Environ.* 2014, 247p.
2. Kovalev V.A., Eichinger W.E. *Elastic Lidar: Theory, Practice, and Analysis Methods*. Wiley-Interscience; New York, NY, USA: 2004, 165p.
3. Mayor S.D., Spuler S.M., Morley B.M., Loew E. Raman-shifted eye-safe aerosol lidar. *Appl. Opt.* 2004, 4590p.
4. Khot L.R., Miller D.R., Hiscox A.L., Salyani M., Walker T.W., Farooq M. Extrapolation of droplet catch measurements in aerosol application treatments. *At. Sprays*. 2011, 630p.
5. Tsai M.Y. Ph.D Thesis. University of Washington; Seattle, WA, USA: 2007. *The Washington Spray Drift Studies: Understanding the Broader Mechanisms of Pesticide Spray Drift*.
6. Hiscox A.L., Miller D.R., Nappo C.J., Ross J. Dispersion of fine spray from aerial applications in stable atmospheric conditions. *Trans. ASABE*. 2006, 1700p.
7. Gregorio E., Rocadenbosch F., Tiana-Alsina J., Comerón A., Sanz R., Rosell J.R. Parameter design of a biaxial lidar ceilometer. *J. Appl. Remote Sens.* 2012, 347p.
8. Dunai D., Zoletnik S., Sarkozi J., Field R. Avalanche photodiode based detector for beam emission spectroscopy. *Rev. Sci. Instrum.* 2010, 81p.
9. Mayor S.D., Spuler S.M. Polarization lidar at 1.54  $\mu\text{m}$  and observations of plumes from aerosol generators. *Opt. Eng.* 2007, 460p.
10. Gong W., Chyba T.H., Temple D.A. Eye-safe compact scanning LIDAR technology. *Opt. Lasers Eng.* 2007, 906p.



11. Setzler S.D., Francis M.P., Young Y.E., Konves J.R., Chicklis E.P. Resonantly pumped eyesafe erbium lasers. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* 2005, 704p.
12. Lavrov A., Utkin A.B., Vilar R. Simple eye-safe lidar for cloud height measurement and small forest fire detection. *Opt. Spectrosc.* 2010, 321p.
13. Salyani M., Farooq M., Sweeb R.D. Spray deposition and mass balance in citrus orchard applications. *Trans. ASABE.* 2007, 2563p.