

ПРОЗОРІСТЬ СЕРЕДОВИЩ В ІНФРАЧЕРВОНОМУ ДІАПАЗОНІ: ЩО БАЧИТЬ ТЕПЛОВІЗОР?

¹Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі проведено фізичний аналіз оптичних властивостей різних середовищ у довгохвильовому інфрачервоному діапазоні (LWIR, 8–14 мкм), який є робочим для більшості тепловізійних систем. Розглянуто квантові механізми поглинання випромінювання діелектриками та напівпровідниками. Пояснено фізичну природу непрозорості силікатного скла та прозорості полімерних плівок для теплового випромінювання. На основі теорії розсіювання Мі обґрунтовано різницю у проходженні ІЧ-променів крізь дим та туман. Робота спростовує поширені міфи щодо можливостей «теплового зору» та пояснює виникнення оптичних артефактів при термографії.

Ключові слова: інфрачервоне випромінювання, тепловізор, спектральна прозорість, LWIR, закон Планка, розсіювання Мі, германій.

Abstract

The paper presents a physical analysis of the optical properties of various media in the long-wave infrared range (LWIR, 8–14 μm), which corresponds to the operational band of most thermal imaging systems. The quantum mechanisms of radiation absorption by dielectrics and semiconductors are considered. The physical nature of the opacity of silicate glass and the transparency of polymer films for thermal radiation is explained. Based on Mie scattering theory, the difference in the transmission of IR rays through smoke and fog is substantiated. The work debunks common myths regarding the capabilities of "thermal vision" and explains the occurrence of optical artifacts in thermography.

Keywords: infrared radiation, thermal imager, spectral transparency, LWIR, Planck's law, Mie scattering, germanium.

Вступ

Інфрачервона (ІЧ) термографія, що дозволяє візуалізувати власне теплове випромінювання об'єктів, стала невід'ємним інструментом у енергоаудиті, військовій справі та промисловій діагностиці. Проте інтерпретація термограм часто ускладнюється тим, що оптичні властивості матеріалів (прозорість, відбивна здатність) у ІЧ-діапазоні кардинально відрізняються від звичних характеристик у видимому спектрі. Інтуїтивне перенесення візуального досвіду на термографію призводить до помилок: наприклад, спроб виміряти температуру об'єкта крізь скло або нехтування відбиттям від полірованих поверхонь.

Метою роботи є системний аналіз фізичних факторів, що визначають прозорість конденсованих та дисперсних середовищ для електромагнітних хвиль довжиною 8–14 мкм, а також пояснення механізмів формування зображення в тепловізійних системах.

Результати дослідження

Згідно із законом зміщення Віна, довжина хвилі, на яку припадає максимум випромінювання абсолютно чорного тіла, обернено пропорційна його температурі: $\lambda_{\text{max}} \approx 2898/T$. Для об'єктів навколишнього середовища з температурою близько 300 К (27 °С) цей пік знаходиться в області 9–10 мкм. Саме тому сучасні неохолоджувані мікроболометричні тепловізори працюють у діапазоні LWIR (Long-Wave Infrared, 8–14 мкм). Взаємодія цього випромінювання з речовиною визначається трьома процесами: поглинанням (α), відбиттям (ρ) та пропусканням (τ), сума коефіцієнтів яких завжди дорівнює одиниці: $\alpha + \rho + \tau = 1$. [1]

Фундаментальна відмінність у прозорості матеріалів для видимого та ІЧ-світла зумовлена їхньою атомною структурою.

Силікатне скло (SiO_2). Для людського ока скло є прозорим, оскільки енергія фотонів видимого світла недостатня для збудження електронів через широку заборонену зону, а частоти коливань іонів

гратки значно нижчі за частоту світла. Однак у діапазоні LWIR енергія фотонів резонує з частотою коливань зв'язків Si-O-Si (фононне поглинання). Це призводить до того, що скло стає абсолютно непрозорим ("чорним") для тепловізора. Коефіцієнт поглинання настільки високий, що випромінювання затримується поверхневим шаром товщиною в кілька мікрометрів. Тому тепловізор, наведений на вікно, показує температуру самого скла, а також відбиття теплих об'єктів у кімнаті (через високий коефіцієнт відбиття ρ в ІЧ-діапазоні).[2]

Полімери (Поліетилен). Молекули поліетилену складаються з простих ланцюжків вуглецю та водню ($C-H, C-C$), які не мають потужних смуг поглинання в діапазоні 8–14 мкм. Тонка поліетиленова плівка, навіть зафарбована чорною фарбою (непрозора для ока), залишається прозорою для довгих ІЧ-хвиль. Це дозволяє тепловізору "бачити" крізь чорні пакети.

Напівпровідники (Германій). Германій (Ge), який виглядає як непрозорий метал, є основним матеріалом для лінз тепловізорів. Завдяки вузькій забороненій зоні та відсутності фононних резонансів у LWIR, він вільно пропускає теплове випромінювання, маючи при цьому високий показник заломлення ($n \approx 4.0$).

Атмосфера містить гази (переважно H_2O та CO_2), які селективно поглинають ІЧ-випромінювання, створюючи "вікна прозорості". Однак найбільший інтерес становить взаємодія з аерозолями (дим, туман). Її описує теорія розсіювання Мі, де ключовим параметром є співвідношення розміру частинки r до довжини хвилі λ ($x = 2\pi r / \lambda$).

Дим: Частинки диму зазвичай мають розмір 0.1–1.0 мкм. Для видимого світла ($\lambda \approx 0.5$ мкм) це призводить до сильного розсіювання (дим непрозорий). Для теплового випромінювання ($\lambda \approx 10$ мкм) виконується умова $r \ll \lambda$, і хвиля огинає частинки майже без втрат. Це пояснює здатність тепловізорів бачити крізь задимлення під час пожеж.

Туман: Краплі води в тумані мають розміри 1–10 мкм і більше, що співмірне з довжиною хвилі LWIR. У цьому випадку виникає резонансне розсіювання Мі, а також сильне поглинання самою водою. Тому густий туман є непрозорим як для ока, так і для тепловізора, значно знижуючи дальність виявлення.[4]

Більшість металевих поверхонь у ІЧ-діапазоні мають низький коефіцієнт випромінювання ($\epsilon < 0.1$) та високий коефіцієнт відбиття ($\rho > 0.9$). Це створює ефект "теплового дзеркала": полірований метал на термограмі виглядає холодним, насправді відображаючи низьку радіаційну температуру неба або холодних стін, що може призвести до значних похибок при безконтактному вимірюванні температури (похибка може сягати сотень градусів).

Висновки

Прозорість матеріалів є спектрально-залежною величиною. Матеріали, прозорі у видимому діапазоні (скло, вода), часто є непрозорими поглиначами в ІЧ-діапазоні через молекулярні резонанси, і навпаки (германій, поліетилен).

Здатність тепловізорів "бачити" крізь перешкоди обмежена фізичними розмірами частинок перешкоди. Вона ефективна для дрібнодисперсних середовищ (дим, пил), але втрачається у середовищах з великими частинками (густий туман, дощ).

Розуміння фізики взаємодії випромінювання з речовиною є критичним для уникнення помилок інтерпретації термограм, особливо при роботі з об'єктами, що мають високу відбивну здатність або знаходяться за напівпрозорими перешкодами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Vollmer M., Möllmann K.-P. Infrared Thermal Imaging: Fundamentals, Research and Applications. 2nd ed. Weinheim: Wiley-VCH, 2017. 792 p.
2. Rogalski A. Infrared Detectors. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2010. 898 p.
3. Kaplan H. Practical Applications of Infrared Thermal Sensing and Imaging Equipment. 3rd ed. Bellingham: SPIE Press, 2007. 186 p.
4. Holst G. C. Common Sense Approach to Thermal Imaging. Winter Park: JCD Publishing, 2000. 376 p.
5. Usamentiaga R., Venegas P., Guerediaga J., Vega L., Molleda J., Bulnes F. Infrared Thermography for Temperature Measurement and Non-Destructive Testing // Sensors. – 2014. – Vol. 14, № 7. – P. 12305–12348.

Мусієнко Ігор Сергійович — студент групи 1KI-25МС, факультет інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: shark9248@gmail.com

Мартинюк Володимир Валерійович — канд. технічних наук, доцент, кафедра загальної фізики, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

Науковий керівник: **Мартинюк Володимир Валерійович** — канд. технічних наук, доцент, кафедра загальної фізики, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

Musienko Ihor S. — student of group 1KI-25MS, Faculty of Information Technology and Computer Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: shark9248@gmail.com

Martyniuk Volodymir V. — PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Department of General Physics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia

Supervisor: **Martyniuk Volodymir V.** — PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Department of General Physics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia