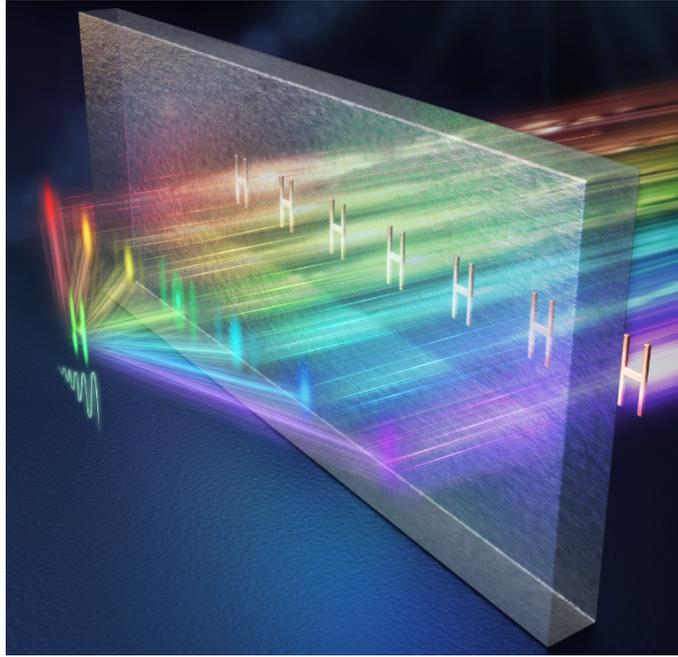


港大物理學家研發新一代光學技術
利用合成複頻波方法克服損耗 提升超透鏡成像品質



圖一、利用合成複頻波方法提升超透鏡成像品質的原理示意圖。在不同實頻率的照明下，通過超級透鏡呈現同一物體時，圖像的模糊程度各有不同，難以準確顯示物體的外觀。但將多個單頻圖像的幅值和相位組合後，便可得到清晰的圖像。圖片來源：香港大學

由香港大學（港大）物理學系系主任（暫任）張霜教授率領的研究團隊，夥拍國家納米科學中心戴慶團隊、英國帝國理工學院 John Pendry 爵士的團隊及美國柏克萊加州大學團隊，合作提出了「多頻率組合複頻波激發超透鏡成像理論機制（Synthetic Complex Frequency Wave Approach）」（如圖一所示），通過虛擬增益來抵消光系統裏的固有損耗，成功提高超透鏡的成像分辨率約一個量級。該研究成果近日剛於權威學術期刊《科學》（*Science*）中發表。

成像在生物學、醫學和材料科學等許多領域發揮着重要作用。光學顯微鏡利用光來獲得微小物體的成像。然而，傳統顯微鏡最多只能解析光學波長數量級的特徵尺寸，即衍射極限。

為了克服衍射極限，倫敦帝國理工學院的 John Pendry 爵士在 2000 年提出了由負折射率介質或銀等貴金屬製成的超透鏡(Superlens)的理論概念。隨後，現任港大校長張翔教授與其時在美國柏克萊加州大學的團隊率先實現了光學超透鏡的實驗，極大地推動了超透鏡技術的發展和應用。自此以後，各國科學家紛紛投放更多資源，致力於超透鏡的研究，使其成為光學領域的熱門課題。然而，超透鏡的固有損耗 (intrinsic loss) 一直是該領域的一個關鍵課題，對提升成像分辨率造成限制。

該論文的通訊作者、港大物理學系系主任（暫任）及講座教授張霜解釋說：「為了解決一些重要而應用中的光損耗問題，我們提出了一種實用的解決方案——使用一種新穎的合成複激發波來獲得虛擬增益，進而抵消光學系統的固有損耗。為了證明這方法的可行性，我們將之應用到超透鏡成像機制中，在理論上讓成像分辨率顯著提升。」

「我們通過在微波頻率範圍內使用由雙曲超材料製成的超透鏡和在光學頻率範圍內的極化子材料製成的超透鏡進行實驗，進一步證明了我們的理論，並獲得了符合我們理論預期的優秀成像效果。」該論文的第一作者、港大博士後研究員管福鑫博士補充道。

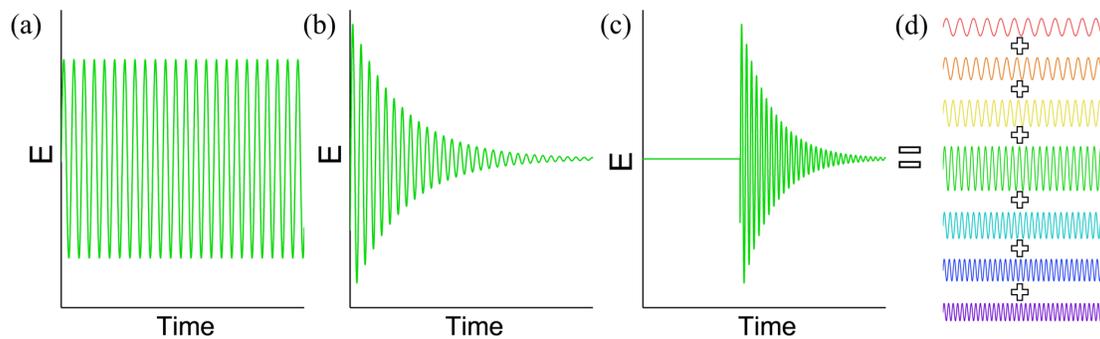
多頻率組合複頻波方法克服光學損耗

光學損耗是限制光子學領域發展的主要瓶頸之一。目前最常用的解決方案是使用放大光信號的增益介質來抵消損耗，但這種設置複雜，還會增加電磁響應的不穩定性和噪聲。在這項研究中，研究人員提出了一種實用的解決方案——借助多頻率組合的複頻波激發來獲得虛擬增益，進而抵消光學體系的本徵損耗，從而獲得更高質量的超透鏡成像分辨率。

到底甚麼是複頻率呢？波的頻率是指它隨時間振盪的速度，就如圖二 a 所示。一般而言，我們會很自然地將頻率視為實數。但是，其實頻率的概念可以擴展到複數領域，其中頻率的虛部 (Imaginary Part) 也具有明確的物理意義，即波隨時間放大或衰減的速度。因此，對於具有負（正）虛部的複頻率，波隨時間衰減（放大），如圖二 b 所示。當然，理想的複頻波並無物理上的意義，由於當時間趨近正無窮大或負無窮大時，複數頻率會發散，具體取決於其虛部的符號。因此，實踐複頻波須限制波的持續時間，

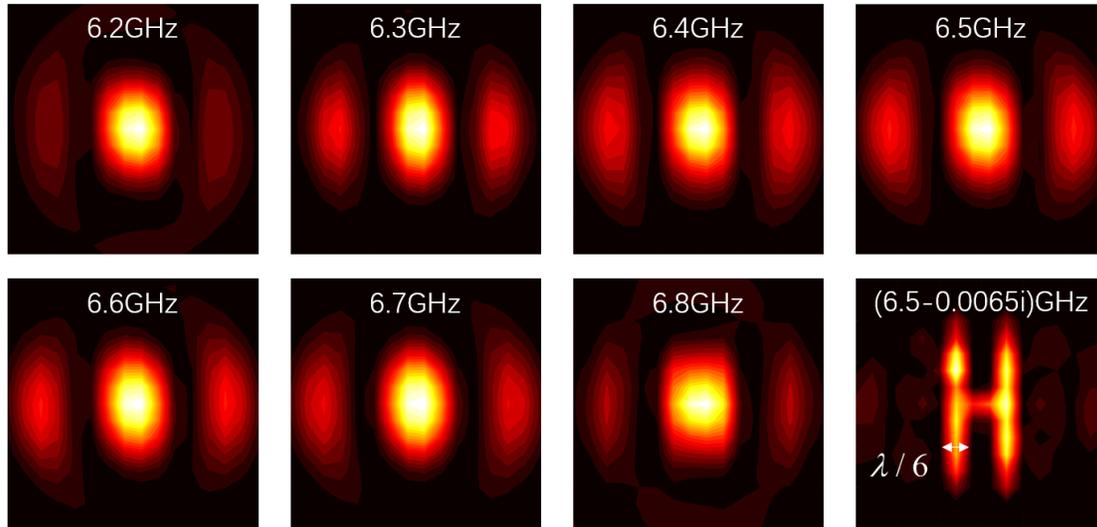
以避免發散（見圖二 c）。然而，基於複頻波的光學測量須在時域（time domain）中進行，並且會涉及複雜的時間選通測量（time-gate measurement），且虛擬增益的信號非常微弱，因此迄今為止尚未在實驗上驗證。這裏，研究團隊採用了新的方法，通過傅立葉變換（Fourier Transformation）將截斷的複頻波拆分為許多不同實頻率的組合（見圖二 d），從而克服了複頻波難以實現的挑戰。

研究團隊最終通過理論預測，發現多頻率組合複頻波激發可以獲得虛擬增益，從而獲得更高質量的超透鏡成像。



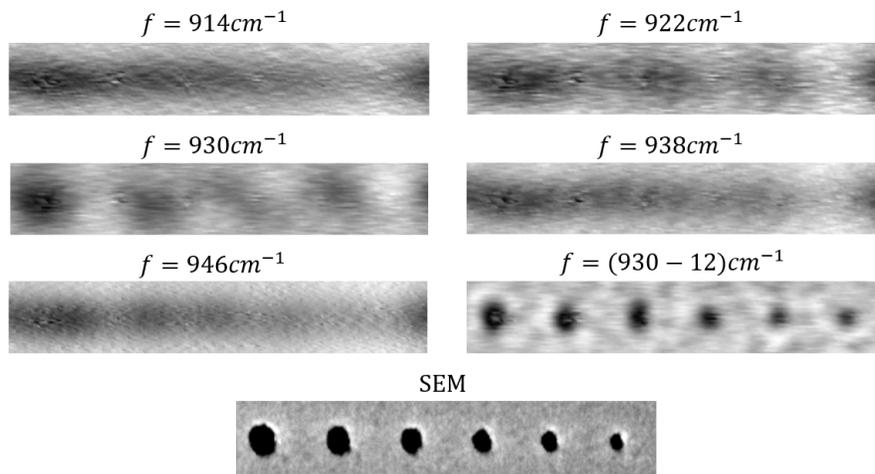
圖二. 實頻率 (a)、複頻率 (b) 和截斷複頻率 (c) 下波的電場分布。由多個實頻率 (d) 的線性組合合成的截斷複頻率波。圖片來源：港大

實驗中，研究團隊首先在微波頻率下使用雙曲超材料（Hyperbolic Metamaterial）進行超級成像。雙曲超材料可以承載具有非常大波矢（或相當小波長）的波，從而能夠傳輸細節相當微小的信息。然而，波矢越大，波對光損耗越敏感。因此，在存在損耗的情況下，那些「小信息」在雙曲超材料內部傳播期間會被丟失。研究團隊表明，將在不同實際頻率下測量的模糊圖像組合，可以在複頻率下形成具有深亞波長分辨率的清晰圖像，如圖三所示。



圖三. 字母“H”的多個實頻率和複頻率的成像模式。圖片來源：港大

該團隊進一步將該原理擴展到光學頻段，創造了碳化矽聲子極化激元材料的光學超透鏡，但損耗仍然限制了成像分辨率。因此，在所有實際頻率下成像的空間分辨率相對較低，如納米級孔的模糊圖像（圖四）。但通過多頻率組合的複頻波激發，進而虛擬增益補償光學損耗，成功將超透鏡的成像分辨率提高了約一個量級，這將對光學成像領域產生巨大影響。



圖四·展示了採用碳化矽極化激元材料構建的光學超透鏡，通過複頻率測量提供了比實頻率更好的空間分辨率。掃描電鏡(SEM)圖像顯示了被成像物體的形貌。圖片來源：港大

「合成複合頻波方法是一種克服光子學系統固有損耗的實用技術，不僅在超透鏡成像領域表現卓越，還

可以擴展到光學的其他領域，例如極化激元分子傳感和波導器件等。這為提高多頻段光學性能、設計高密度集成光子芯片等方向提供了一條潛在的途徑。」論文另一通訊作者、港大校長兼物理學系及機械工程系講座教授張翔教授表示，此新方法具有廣泛適用性，他說：「這個方法可以拓展到其他波動體系，如聲波、彈性波以及量子波等，以解決光損耗的問題，將成像質量提升到另一個層次。」

此研究獲新基石科學基金會、香港研究資助局所支持。

詳情請參看研究論文：‘Overcoming losses in superlenses with synthetic waves of complex frequency’, *Science*.

連結：<https://www.science.org/doi/10.1126/science.adi1267>

更多有關張霜教授的研究請見：<https://shorturl.at/efCN1>

傳媒如有查詢，請聯繫港大學理學院外務主任杜之樺（電話：3917 4948；電郵：caseyto@hku.hk / 助理傳訊總監陳詩迪（電話：3917 5286；電郵：cindycst@hku.hk）。

相片下載及說明：<https://www.scifac.hku.hk/press>