

知識天地

次毫米波差頻式天文儀器之技術挑戰

黃裕津助研究員 (天文及天文物理研究所籌備處)

2003 年 11 月，本所與美國史密松天文臺合作建造之次毫米陣列(The Submillimeter Array)落成啓用，開啓了次毫米波天文觀測的歷史新頁，結束了次毫米波頻段沒有合成口徑干涉儀式望遠鏡陣列的時代。次毫米波陣列在啓用時，陣列內的八具望遠鏡配備有三個差頻式接收機頻段，分別為 176-256GHz、250-354GHz 及 600-696GHz。在啓用後除補足 600-696GHz 差頻式接收機模組，且增設 320-420GHz 頻段。目前正由美國、歐洲、日本等十餘國聯合建造、我國亦參與的阿塔伽瑪大型毫米與次毫米陣列(Atacama Large Millimeter and Submillimeter Array, ALMA)亦包含了 31.3-950GHz 頻率範圍中的十個差頻式接收機頻段。然而，對高於 500GHz 以上的頻率而言，現有的差頻式接收機性能及操作之便利性仍有許多改善之空間，對研究差頻式接收機的科學家及工程師而言，這意味著新技術的開發與挑戰。本文將就關鍵偵測器元件技術、本地振盪信號源、天線及光學系統等面向介紹相關的技術發展。

關鍵偵測器元件技術

對頻率高於 115GHz 之毫米波及次毫米波差頻式天文接收機而言，微米尺寸之超導—絕緣—超導結 (superconductor-insulator-superconductor junction, SIS junction)製成的量子混頻器是前級偵測器元件的最佳選擇。早期因眾多毫米波望遠鏡之需求，以鈮(Niobium, Nb)為超導材料佐以氧化鋁絕緣層之製程技術因多年的研究發展，已趨於成熟穩定，可以滿足接近量子極限的低雜訊要求。然而當操作頻率升高時，鈮—氧化鋁—鈮量子混頻器就面臨諸多問題。第一個要面對的是夏比洛階(Shapiro Step)，這是量子混頻器中產生超導電流的穿隧振盪，將造成的強烈不穩定訊號，理論上它可以透過外加磁場抑制，但是對高於 400GHz 以上的操作頻率而言，鈮—氧化鋁—鈮量子混頻器的最低雜訊操作偏壓正好接近夏比洛階，因而形成低雜訊卻低穩定度之接收機操作。第二個困難是當偵測光子的能量大於超導體的能隙時，超導體內的庫伯電子對 (Copper pair)將會被吸收的光子直接裂解成似粒子電子 (quasi-particle electrons)，在巨觀現象將造成超導體微帶傳輸線的損耗，其導體損耗甚至高於高導電度金屬，進而造成量子混頻器的雜訊溫度升高，對操作於 4K 液氮溫度的鈮而言，超導體能隙為 2.8meV，相當於頻率約 700GHz 的光子能量。對頻率高於 700GHz 的次毫米波差頻式天文接收機，鈮-SIS 混頻器是難以滿足量子極限的低雜訊要求，新的超導材料系統如氮化鈮(NbN)、或氮化鈦鈮(NbTiN) 佐以氮化鋁絕緣層預期可以在 1.4THz 及 1.2THz 以下提供良好的量子混頻器。由於 ALMA 的第十頻段落在 780-950GHz，且其龐大的元件數量需求，目前日本國立天文臺 (NAOJ)、國立情報通信技術研究所(NICT)及本所超導體製程實驗室，分別針對最佳的三種不同的超導材料系統組合進行製程研發，預期將能達到低於 345K 之接收機雜訊溫度要求。

本地振盪信號源

本地振盪信號源是確保差頻式天文接收機性能的另一個重要因素。在過去，因為單頻電磁振盪的產生的兩種機制——負電阻電子元件的頻率上限(~200GHz) 及光電元件的頻率下限(2THz)有一明顯的兆赫間隙 (THz Gap)，過去十年因為寬能隙半導體材料的發展，對氮化鎵岡恩二極體(GaN Gunn Diode)的理論及實驗已證實可產生打破兆赫間隙的振盪信號，但要達到實用階段，尚有許多技術問題待克服。由於 SIS 混頻器在本地振盪信號功率需求僅達奈瓦 (nanowatt)級，目前常用的本地振盪信號源仍以毫米波磷化銦岡恩二極體振盪器、或砷化鎵或磷化銦異質雙極電晶體 (heterojunction bipolar transistor, HBT)振盪器在 70-125GHz 形成鎖相迴路，加上倍頻器乘頻。然而此一架構會遇上兩個困難，第一，當倍頻器乘頻數增加，其功率效率轉換會隨之降低，但 SIS 混頻器的本地振盪功率需求卻是隨操作頻率的增加而升高，如果使用耦合方式合併射頻信號與本地振盪信號，則本地振盪信號耦合量的增加，將造成射頻信號的傳輸損失增加；反之如要壓低射頻信號傳輸損失，本地振盪信號將不足以驅動 SIS 混頻器達到最佳操作點。欲解決這個困難，目前在 ALMA 的第九頻段 (602-720GHz)及第十頻段將透過低溫操作倍頻器以強化其轉換效率，並以毫米波功率放大器提高倍頻器之輸入功率。第二，本地振盪信號的相位雜訊會隨倍頻器乘頻數增加而升高，因

而造成信號積分的品質降低。其解決之道在於提升鎖相基頻振盪器的相位品質，而改善的方法除了慎選基頻振盪器元件，及最佳化鎖相迴路的設計之外，鎖相基準信號的頻率選擇也是重要的因素。目前運轉中的次毫米陣列是以 6-8GHz 的信號作為陣列的鎖相信號基準，遠低於鎖相基頻振盪器頻率；而 ALMA 則將鎖相信號基準頻率提昇到 27-122 GHz，接近鎖相基頻振盪器之頻率，預期在較高的鎖相信號基準頻率將可度大幅提升本地振盪信號之相位品質，然而在如此高頻進行長距離信號傳送，傳輸損耗及相位漂移的抑制實為一大挑戰，而此一技術難題已由近十年微波光子學(microwave photonics)的發展所克服，達到滿足 ALMA 系統規格的要求。

天線及光學系統

次毫米波接收機的信號聚焦，以金屬拋物反射鏡或鐵氟龍透鏡達成，由於在 500GHz 以上之高頻有較高的金屬導體的反射損失和介電材料的穿透損失，會造成較大的接收機輸入光學損失，一般認為金屬拋物反射鏡有較低的光學損失，但其離軸(off-axis)光徑設計會造成機械校準的困難；鐵氟龍透鏡因同軸光徑設計其機械校準較容易達到高精度要求，但其較高之介電穿透損失將降低接收機靈敏度，改善方式是改用更低介電穿透損耗材料—石英製作透鏡，但因其硬度甚高，機械加工困難且成本高昂，目前尚無實例。次毫米波光學系統在機械加工與組裝精確度的要求，由於波長小於 600 微米，對 5° 相位誤差而言，必須保持機械誤差小於 8 微米，因此對接收機模組而言，達到數十微米等級的組裝精確度，是確保光學精確度的首要條件；而接收信號之號角天線其製作精度更在微米左右。

未來技術趨勢

在 1-10THz 以上的兆赫波天文觀測儀器，目前仍然是剛開發的新領域，目前實驗室所發展的差頻式接收機以氮化銲熱電子輻射熱定計(hot-electron bolometer, HEB)作為混頻器，搭配量子井串級雷射(quantum cascade laser, QCL)作為本地振盪信號源，在 1.0-4.2THz 已有低於十倍量子極限之良好靈敏度；然而良好的兆赫波觀測臺址除了阿塔伽瑪地區的六千公尺高原、南極大陸穹 A (Dome-A)及穹 C (Dome C)等地區之外，就只能往平流層(飛機搭載之望遠鏡)及太空發展。即將於今年五月六日發射升空的赫歇爾太空天文臺配備之差頻式接收機將涵蓋 0.96-1.12THz、1.12-1.27THz、1.41-1.91THz 等頻段。美國史密松天文臺的 1.1THz 及 1.5THz 差頻式接收機亦有地面實驗性觀測成果發表。中國大陸主導的南極大陸穹 A 臺址評估探勘亦將展開工作。在遠程計畫方面，荷蘭太空研究院提出涵蓋 1-6THz 之太空遠紅外線差頻式干涉儀差頻式(Far-Infrared Heterodyne Interferometry Array from Space)概念構想。在可見的未來，兆赫波差頻式接收機的技術發展將隨著天文學家在觀測儀器需求而不斷提升。