

量子雜訊極限靈敏度的兆赫波接收系統

THz Receiver System with Quantum Noise Limit Sensitivity

王明杰

Ming-Jye Wang

SIS (superconductor-insulator-superconductor) 超導兆赫波混頻元件的發展，開啟了兆赫波天文研究的大道。1996 年中央研究院天文及天文物理研究所加入 SMA 望遠鏡計畫，發展出量子雜訊極限靈敏度的兆赫波接收系統，目前已加入 SMA 天文望遠鏡陣列的觀測。本文簡介 SIS 超導兆赫波混頻元件的設計與製作、接收系統與性能測試結果。

The development of SIS (superconductor-insulator-superconductor) mixer provides a significant tool to astronomer for understanding the universe through THz window. AISAA (Institute of Astronomy and Astrophysics, Academia Sinica) participated the SMA (Sub-millimeter Array) project since 1996 and have developed THz receiver system with quantum noise limit sensitivity. These receiver systems have been installed in SMA and perform as part of array. This article will introduce the design and fabrication of SIS mixer and receiver system performance on THz frequency band.

一、前言

近三十年來，隨著超導偵測元件設計及製作能力的改善，利用超導偵測元件所發展之高靈敏天文望遠鏡，讓兆赫波的天文望遠鏡得以快速發展，在未來 ALMA (Atacama large millimeter array) 天文望遠鏡建造完成而達到極致。兆赫波超導元件隨著天文上的需求，已發展出各式不同型式的偵測元件，大致可分成能量偵測元件 (direct detectors) 與混頻元件 (heterodyne mixers)。能量偵測元件是利用超

導元件接受兆赫波照射後，其特性隨之改變，藉由測量其特性改變量而達到測量兆赫波的強度。此類元件適合做成元件陣列，在單一望遠鏡上，直接形成天體兆赫波分布的圖像 (image)。混頻元件則是利用超導元件的電流－電壓關係強烈之非線性，耦合已知之兆赫波訊號 (local oscillator, LO)，將所要測量之兆赫波頻率轉化成低頻訊號，同時又可以保留兆赫波訊號的相位 (phase)。此類超導元件適合用於干涉陣列之望遠鏡。

直接偵測的超導元件有利用超導轉變電阻急劇

改變特性的輻射熱偵測器 (transition edge sensor, TES)⁽¹⁾、利用兆赫波光子能量打破超導電子對而增加穿隧電流的超導穿隧結偵測器 (superconducting tunnel junction, STJ)⁽²⁾ 與利用兆赫波光子改變高 Q 值超導共振器電感的動態電感偵測器 (kinetic inductance detector, KID)⁽³⁻⁴⁾。這些直接偵測之超導元件必須工作在低溫 (一般在 0.3 K 以下)，方能將熱擾動所產生的訊號降低，目前這些元件的雜訊等效功率 (noise equivalent power, NEP) 約在 $10^{-16} - 10^{-18} \text{ W} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ ，還適合觀測強兆赫波源星體，對於弱兆赫波光源星體，NEP 須在 $10^{-20} \text{ W} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 以下。

混頻元件則有 SIS 穿隧結混頻元件 (SIS tunnel junction mixers) 與熱電子輻射熱偵測混頻元件 (hot electron bolometer, HEB, mixers)。以 Nb 為基礎之 SIS 穿隧結混頻元件已經發展相當成熟，其超高之靈敏度，被廣泛應用在天文望遠鏡上。但是，SIS 混頻元件的工作頻率受限於材料的超導能隙，目前只適用於 1.4 THz 以下的頻率偵測。HEB 混頻元件為最近發展的混頻元件，利用奈米技術製作，其高頻 ($F > 1.4 \text{ THz}$) 的性能優於 SIS 混頻元件，且所需的 LO 功率較小 ($< 1 \mu\text{W}$)，適用於衛星兆赫波天文望遠鏡。

中央研究院加入次毫米波陣列 (submillimeter array, SMA) 天文望遠鏡計畫，發展及建造兩台包含接收系統之次毫米波 (0.2–0.9 THz) 望遠鏡。上述提及，在此頻段中，SIS 混頻元件的性能最優，且適用於干涉陣列接收系統，本文主要介紹我們所發展的兆赫波 SIS 混頻接收系統。

二、SIS 超導混頻元件之設計與製作

天文望遠鏡使用之兆赫波接收元件，主要強調其高靈敏度，對訊號的耦合效率要求高，相對地有時會犧牲元件的使用頻寬，但以設計不同頻帶元件的方式，涵蓋較寬的頻譜。同時為了配合天文望遠鏡操作之簡單化要求，已將大部分之相關線路納入元件設計。SMA 之超導混頻元件主要分為大尺寸結構與小尺寸結構設計兩部分。圖 1(a) 中顯示大尺寸結構，包含從兆赫波波導將訊號集中的結構，限制兆赫波訊號向其他方向傳遞的過濾器，直流電

源輸入端與中頻訊號輸出端等。將這些結構整合後，利用電腦軟體模擬所設計頻帶之兆赫波訊號在此結構中傳播的特性。藉由調整各結構的尺寸，得到在訊號饋入點有最強的訊號傳入，以及訊號在此點的傳播阻抗與頻率關係不大。

圖 1(b) 為小尺寸結構的電子顯微鏡照片，兆赫波從饋入點後，經由 Nb/SiO₂/Nb 的傳輸線導向混頻元件的核心結構，此傳輸線的長度接近 $\lambda/4$ ，可匹配饋入點與核心結構間阻抗。核心結構為 PCTJ (parallel connected twin junctions) 設計，以傳輸線將兩個尺寸約 $1 \mu\text{m}$ 之 SIS 結並聯。傳輸線的功能為抵消 SIS 結的寄生電容 (parasitic capacitance)，讓 PCTJ 核心結構表現出純電阻行為，增加兆赫波訊號與 SIS 結的耦合係數。整個混頻元件的性能以中國紫金山天文台史生才博士所開發之程式進行模擬，包含饋入點的兆赫波傳輸阻抗及小尺寸結構的參數，藉由調整參數達到最佳化。

PCTJ 結構可看成一 RLC 線路，所以混頻元件操作的中心頻率由 SIS 結的寄生電容 (C_j) 與連結 SIS 結之傳輸線的等效電感 (L_{eff}) 決定 ($f_c = 2\pi / \sqrt{L_{\text{eff}} C_j}$)，而頻寬 Δf 則為 $1/f_c C_j R_n$ ， R_n 為 PCTJ 的一般穿隧電阻 (normal tunneling resistance)，所以設計寬頻的混頻元件需要小尺寸但低 R_n 的 SIS 結。以 Nb 為基礎之混頻元件而言，在考慮製作元件的能力與 SIS 結的品質下，尺寸 $1 \mu\text{m}$ 以上與 10 kA/cm^2 以下之超導電流密度 J_c 的 SIS 結為主要的設計參數 (J_c 與 R_n 的關係為 $R_n J_n A = 1.95 \text{ mV}$ ， A 為 SIS 結的面積)。此時所設計的頻寬約在 20% 左右，設計細節詳見參考文獻⁽⁶⁾。

兆赫波 SIS 超導混頻元件主要是以 Nb/AlO_x/Nb 結構所形成之 SIS 結與 Nb/SiO₂/Nb 的傳輸線，因此混頻元件製程首重 Nb 薄膜、AlO_x 穿隧障壁的品質、SiO₂ 的品質與厚度的控制，詳細的製程細節見參考文獻⁽⁷⁻⁸⁾。

三、兆赫波混頻接收系統

1. 混頻元件的噪音溫度極限

電磁波接收系統的靈敏度在不同的研究領域中雖有不同表示方法，終歸還是以所能偵測到電磁波

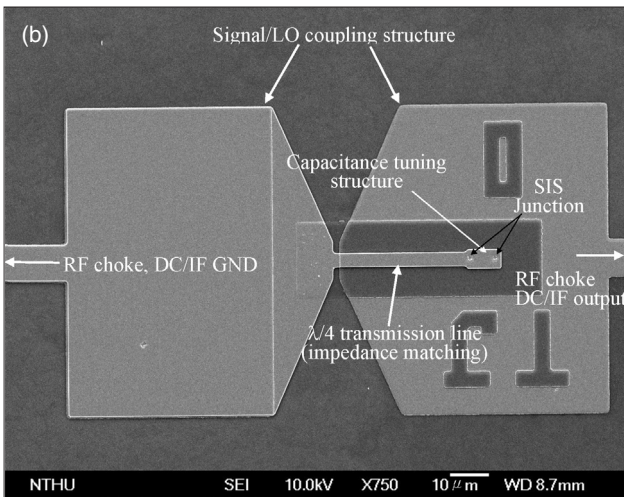
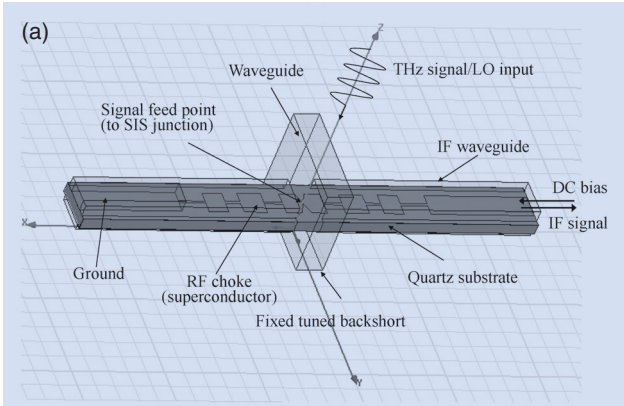


圖 1. (a) 混頻元件的大尺寸結構，包含集波小天線、兆赫波過濾器與直流偏壓輸入端與中頻訊號輸出端。(b) 混頻元件小尺寸結構的電子顯微鏡照片，包含阻抗匹配之傳輸線結構與 PCTJ (parallel connected twin junctions) 之核心結構。PCTJ 為以傳輸線將兩個 SIS 結並聯。傳輸線的功能為抵消 SIS 結的寄生電容 (parasitic capacitance)，讓 PCTJ 核心結構表現出純電阻行為。

的最低功率為標準。在兆赫波接收系統，等效的噪音溫度 (noise temperature) 常被作為衡量系統靈敏度的尺度，也就是將接收系統所產生的雜訊功率等化成某一溫度下之黑體所輻射的功率。在室溫或 77 K，溫度 T 之黑體所輻射之兆赫波功率大致可寫成 kBT' ，其中 $T' = \frac{hf}{e^{hf/kT} - 1} \cdot \frac{1}{k}$ 為等效溫度 (稍小於 T)， k 為波茲曼常數， B 為所測量兆赫波之頻寬， h 為蒲郎克常數。

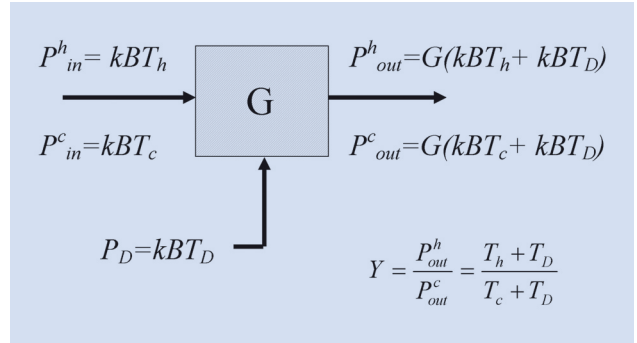


圖 2. 利用 Y -因子 (Y -factor) 方法測量元件噪音溫度的示意圖。

Oliver 在 1965 年提出外差式混頻元件的噪音溫度極限⁽⁵⁾ 為

$$T_{\min}(\omega) = \frac{hf}{e^{hf/kT} - 1} \cdot \frac{1}{k} + \frac{hf}{k} \quad (1)$$

其中 T 為混頻元件的物體溫度 (physical temperature)， f 為電磁波的頻率， k 為波茲曼常數， h 為蒲郎克常數。式 1 中的第一項來自熱輻射，第二項來自海森堡測不準原理 (Heisenberg uncertainty principle)。混頻元件的最低噪音溫度隨著所測電磁波頻率增加而升高，但可分為低頻區或 thermal region 與高頻區或量子區 (quantum region)。在低頻區 (thermal region)， $hf/kT \ll 1$ ， $T_{\min} \approx T + hf/k \approx T$ ，此時噪音溫度極限就是混頻元件的工作溫度，與所測頻率無關。在高頻區 (quantum region)， $hf/kT \gg 1$ ， $T_{\min} \approx hf/k$ ，噪音溫度極限正比於所測頻率。以 0.6 THz 之兆赫波而言， $hf/k = 28.8$ ，當混頻元件工作在 4.2 K 時，混頻元件的最低噪音溫度為量子噪音極限 (quantum noise limit)， $T_{\min} \approx hf/k$ 。

2. 噪音溫度的量測

元件之噪音溫度可利用 Y -因子 (Y -factor) 方法測量，圖 2 為示意圖。將會產生噪音 (noise) 的元件看成一個理想無噪音元件加上一外部噪音輸入，其等效噪音溫度為 T_D 。當元件之輸入端負載為 kBT 時，其輸出為 $GkB(T + T_D)$ ，其中 G 為元件的增益 (gain)。 Y 因子的定義如下：

$$Y = \frac{P_{out}^h}{P_{out}^c} = \frac{T_h + T_D}{T_c + T_D} \quad (2)$$

所以元件的等效噪音溫度可表示為

$$T_D = \frac{T_h - YT_c}{Y - 1} \quad (3)$$

Y 因子可以從熱負載 (hot load) 與冷負載 (cold load) 時元件輸出功率的比值得到，從而得到元件的等效噪音溫度。

接收系統是由許多部分組成，但可將整個系統視為元件。圖 3 中之系統包括接收天線 (耦合係數 c ，噪音溫度 T_A)、混頻元件 (增益為 G_M ，噪音溫度為 T_M) 與中頻放大器 (增益為 G_{IF} ，噪音溫度為 T_{IF})，將系統等效為具有 G_{RX} 增益與 T_{RX} 等效噪音溫度之元件。利用 Y -因子方法， T_{RX} 與元件特性的關係為

$$T_{RX} = \frac{1}{c} \left[(1-c)T_A + T_M + \frac{T_{IF}}{G_M} \right] \quad (4)$$

由式 (4) 可知，接收天線與混頻元件的性能在接收系統中是最為重要的參數。在兆赫波之低噪音溫度的接收系統，均使用特殊設計之接收天線，增加訊號的耦合係數，且放置在低溫環境，減低天線之噪音溫度 T_A 。並採用低溫之超導混頻元件與中頻放大器，減低混頻元件之噪音溫度 T_M 與 T_{IF} 。

3. 兆赫波混頻接收系統

兆赫波混頻接收系統主要包含準光學系統 (quasioptical system)、混頻器與中頻訊號處理三大部分，圖 4 為實驗室內兆赫波接收系統之示意圖。LO (local oscillator) 訊號由半導體振盪器產生 W-band 的訊號 ($F \sim 85 - 120$ GHz)，再經過倍頻器倍頻而成，其功率約在幾十微瓦 (μW)。兆赫波訊號源則是來自特製之兆赫波黑體 (black body) 之輻射。LO 訊號與兆赫波訊號經金屬線柵 (metal wire grid) 耦合後進入低溫杜瓦瓶，再經偏軸拋物面反射鏡聚焦，進入混頻基座。混頻基座包含高效率訊號收集能力之特製波浪號角天線 (corrugated horn antenna)、兆赫波波導管、超導混頻元件與中頻訊

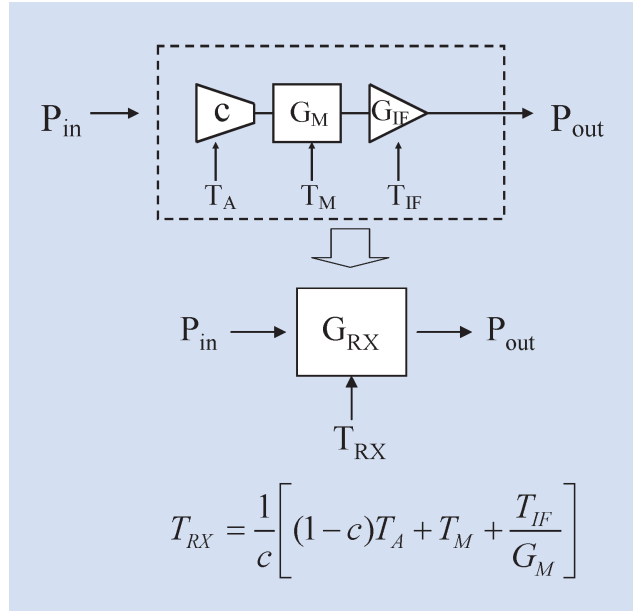


圖 3. 測量接收系統噪音溫度之示意圖。接收系統包括接收天線 (耦合係數 c ，噪音溫度 T_A)、混頻元件 (增益為 G_M ，噪音溫度為 T_M) 與中頻放大器 (增益為 G_{IF} ，噪音溫度為 T_{IF})。接收系統可等效成為具有 G_{RX} 增益與 T_{RX} 等效噪音溫度之元件。

號/直流偏壓之輸出/輸入端，整個混頻基座的溫度固定在 4.2 K。兆赫波訊號降頻後之中頻訊號，經過低溫 HEMT (high electron mobility transistor) 放大器放大，再導出低溫杜瓦瓶，經過後級放大器放大後，進行一般的微波訊號分析。圖 5 為實際之兆赫波接收系統。

此接收系統中，訊號的饋入方式結合幾何光學與微波波導的概念，主要是縮短兆赫波在波導中傳播的距離，減少波導表面電阻所造成的能量損失。但是在兆赫波訊號與混頻器耦合時，則採用波導的方式，增加耦合效率。大部分的組件放置在低溫，則可以降低各元件因熱擾動而產生的雜訊。金屬線柵是一種線性極化器 (linear polarizer)，只讓電場方向垂直 (平行) 線柵方向的電磁波反射 (透射)，藉由調整線柵的方向，可調整 LO 訊號 (具有線性偏振的特性) 進入杜瓦瓶的強度。另外，混頻基座內之兆赫波波導設計使得垂直偏振成為主要的傳波模式，因此兆赫波之耦合係數與入射光的偏振方向 (線柵的方向) 有關。

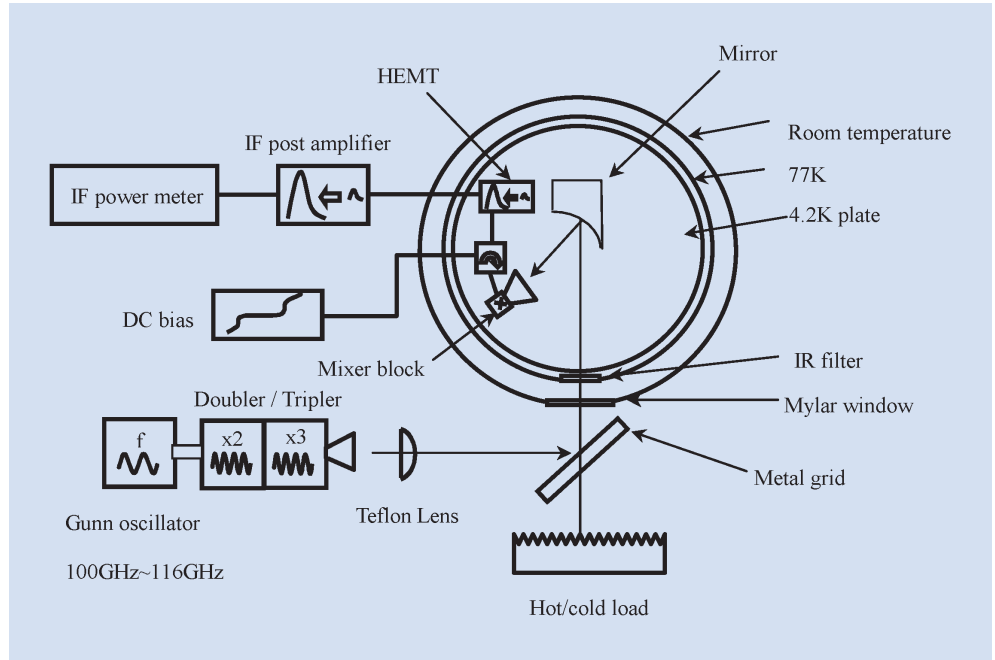


圖 4. 實驗室內兆赫波接收系統之示意圖。主要包含 LO 與訊號源、準光學系統、接收天線及混頻元件、直流偏壓與中頻訊號放大器等。

四、SIS 超導兆赫波接收系統性能

圖 6 為混頻元件性能測試之典型結果，其 LO 的頻率為 0.36 THz。圖中黑色虛線為一般之 $I-V$ 曲線，超導電流部分已被外加磁場壓抑至最低。黑色實線則為 LO 照射下之 $I-V$ 曲線，在超導能隙 (~2.7 mV) 上下可看見光子輔助穿隧 (photon assistant tunneling, PAT) 效應所產生的電流台階，電流的增加量與耦合之 LO 總能量成正比。紅色實線 (／虛線) 為混頻元件在 LO 及熱 (／冷) 負載照射下所產生中頻 (4–6 GHz) 能量與偏壓的關係曲線，實線與虛線的比值，即為 Y -因子在不同偏壓下的值。另外，耦合之 LO 能量與混頻元件的中頻轉換效益有關，也會直接影響混頻元件的性能。圖 7 為 T_{RX} 及 Y -因子與電流增加量 (LO 強度) 的關係圖。隨著 LO 強度增加， Y -因子逐漸增加後再變小， T_{RX} 則先降低後再增加。

線柵的作用在於將兆赫波訊號與 LO 一起引進接收天線內，而線柵與波導偏振方向的夾角，決定線柵對兆赫波訊號的耦合係數，同時影響接收系統的噪音溫度，其關係如下：

$$T'_{RX} = \frac{T_{RX} + (1-c)T_{amb}}{c} \quad (5)$$

其中， T'_{RX} 為包含線柵之接收系統噪音溫度， T_{RX} 為不包含線柵之接收系統噪音溫度， c 為線柵之兆赫波訊號耦合係數， T_{amb} 為環境溫度。圖 8 為線柵之角度與接收系統噪音溫度的關係圖。黑點為實驗數據，隨著線柵角度增加 (耦合係數變小)，系統噪音溫度快速增加，其行為與由式 (5) 所得到的結果 (黑線) 相符。提升 LO 訊號功率，為增加線柵耦合係數最直接的方法，此時可將線柵的方向調整與波導的偏振方向幾乎相同，仍保有足夠的 LO 耦合

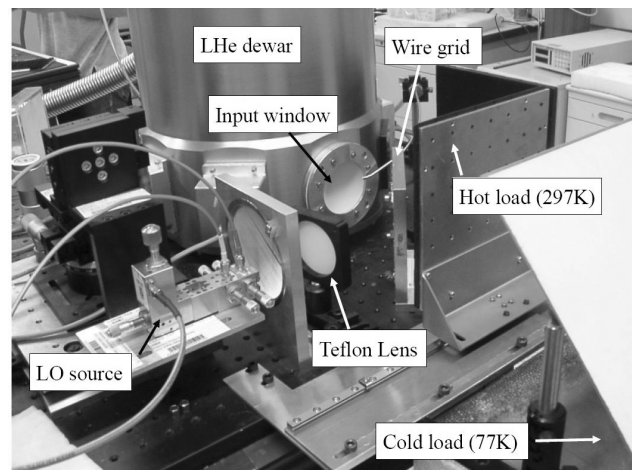


圖 5. 實驗室之 0.6–0.7 THz 之接收系統。

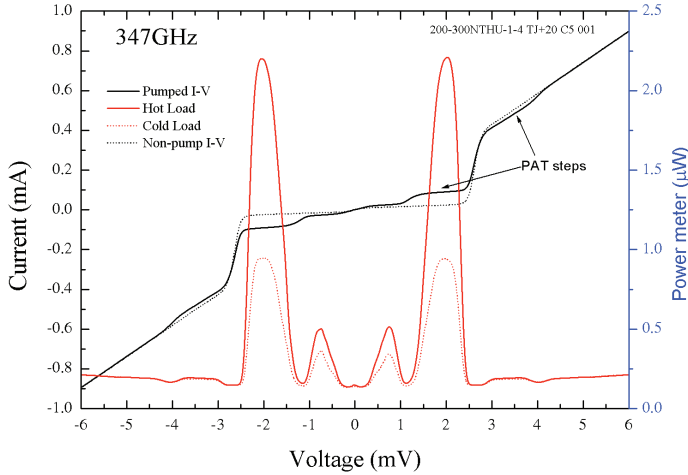


圖 6. 混頻元件性能測試之典型結果，其 LO 的頻率為 0.36 THz。黑色虛線為一般之 $I-V$ 曲線。黑色實線則為 LO 照射下之 $I-V$ 曲線，在超導能隙 (~ 2.7 mV) 上下可看見光子輔助穿隧效應 (photon assistant tunneling effect) 所產生的電流台階。紅色實線 (／虛線) 為混頻元件在 LO 及熱 (／冷) 負載照射下所產生中頻 (4–6 GHz) 能量與偏壓的關係曲線。

量，但高功率且寬頻的兆赫波 LO 系統不容易製作。另一種方法是使用 MPI (Martin-Puplett interferometer) (見圖 9)，MPI 是一種兆赫波的干涉儀，可增加兆赫波訊號與 LO 的耦合係數，圖中藉由兩個屋頂形反射鏡的反射，將原本偏極方向互相垂直的兆赫波訊號及 LO 轉換成具有相同的偏極方向。當 L_1 與 L_2 的差值為波長的整數倍時，輸出的能量會與輸入的能量相同，如此可同時兼顧兆赫波訊號與 LO 訊號的耦合效率，但是光學路徑複雜，調整不易。

整個兆赫波接收系統的性能可藉由調整直流偏壓、LO 的能量及光學耦合係數，讓接收機的性能最佳化，達到量子噪音極限的等級。圖 10 為使用我們所製作的 SIS 結超導混頻元件，在實驗室內之接收系統的性能測試結果，其中包含四個 SMA 頻段 (0.23 THz、0.3 THz、0.38 THz 及 0.66 THz) 的混頻元件。實心圓點為不含訊號耦合線柵的接收系統噪音溫度，大部分介在四倍及六倍量子噪音溫度 (hf/k) (實線) 之間。因為系統的噪音溫度已經接近量子噪音極限，除了 SIS 結外，其他部分的貢獻都

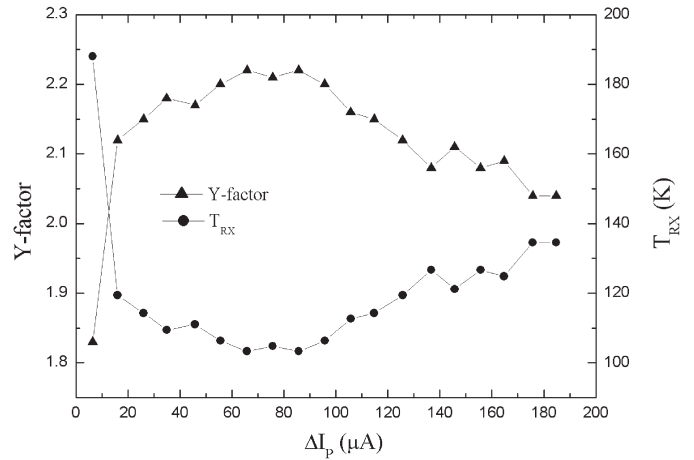


圖 7. T_{RX} 及 Y -因子與電流增加量 (LO 強度) 的關係圖。

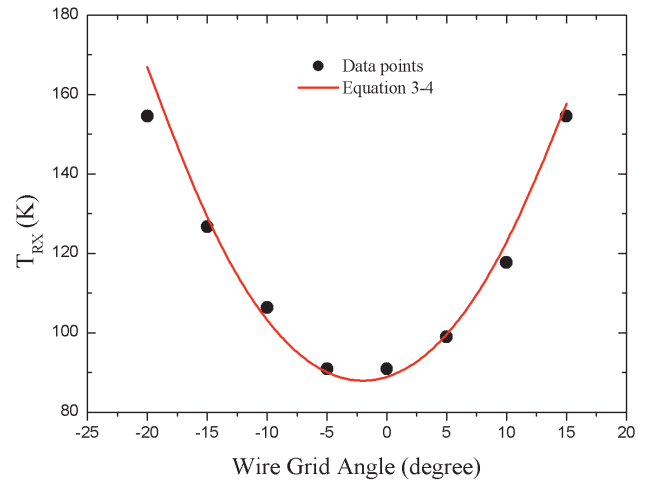


圖 8. 線柵之角度與接收系統噪音溫度的關係圖。實驗數據與文中式 (5) 所得到的結果 (黑線) 相符。

會明顯影響系統性能，其中來自中頻放大器的貢獻 (約 15–25 K) 為最大。空心圓點則是減去中頻放大器的噪音溫度，只包含窗口吸收、接收天線與混頻元件的噪音溫度，已經低於三倍的量子噪音極限。

宇宙來之兆赫波訊號，經 6 m 之碟型天線收集後，引入望遠鏡之兆赫波接收系統，其光學路徑設計較為複雜，組裝的精準度及鏡面品質要求較高，以減少訊號傳遞時的損耗。SMA 之八台望遠鏡中，有兩台望遠鏡裝置我們所製作的兆赫波混頻元件，目前已得到許多初期科學成果⁽⁹⁾，且持續發揮其強大的功能。

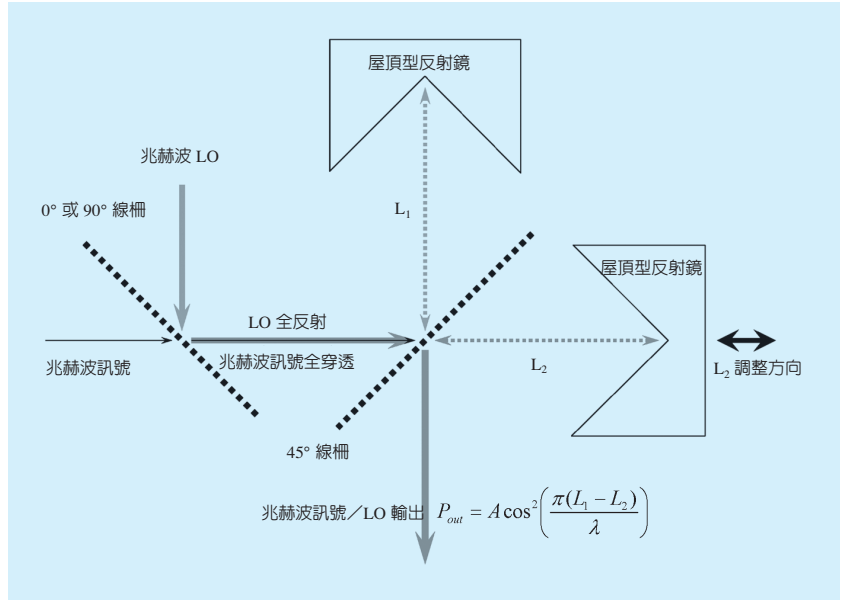


圖 9. MPI (Martin-Puplett interferometer) 干涉儀，可增加兆赫波訊號/LO 進入接收天線的耦合係數。

五、結論

本文介紹了 SIS 超導混頻元件的設計與製作，以及低雜訊超導兆赫波混頻元件的接收系統，目前這些接收系統的性能已經接近量子噪音的靈敏度。超高的靈敏度非常適合使用在研究從宇宙來的極微弱訊號，除了 SMA 外，已有眾多望遠鏡配備這類混頻接收系統。另外，不同型態的超導元件，因其超高靈敏特性，已經被廣泛應用，如 SQUID、MRI、NMR 等。兆赫波混頻元件在其他研究領域方面的應用潛力值得進一步研究。

參考文獻

1. P. L. Richards, *Journal of Superconductivity: Incorporating Novel Magnetism*, **17** (5) (2004).
2. H. Matsuo *et al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **13** (2), 1128 (2003).
3. P. Day *et al.*, *Nature*, **425** (6960), 817 (2003).
4. D. Prober, *Nature*, **425** (6960), 777 (2003).
5. B. M. Oliver, *Proc. IEEE*, **53**, 436 (1965).
6. C. C. Chin *et al.*, *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, **23** (5) (2002).
7. M. J. Wang *et al.*, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, **62**, 1731 (2000).
8. M. J. Wang *et al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **13** (2) (2003).
9. Special Issue on The SAO/ASIAA Submillimeter Array, *The Astrophysical Journal Letter*, **616** (1), Part 2 (2004).

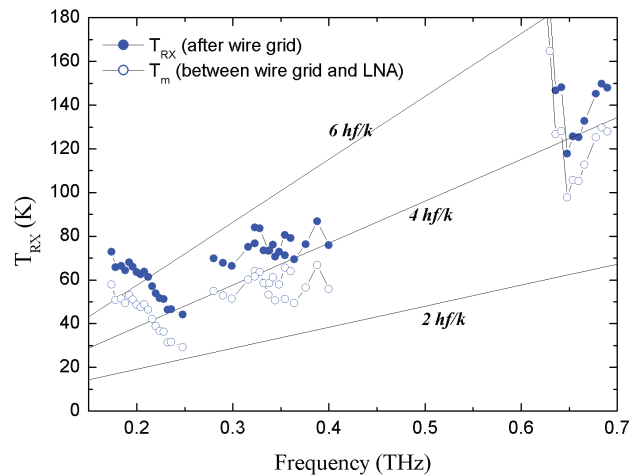


圖 10. SIS 結超導混頻接收系統的性能測試結果，其中包含四個 SMA 頻段 (0.23 THz、0.3 THz、0.38 THz 及 0.66 THz) 的混頻元件。實心 (空心) 資料為包含 (不包含) 中頻放大器噪音溫度的結果。

- 王明杰先生為國立清華大學物理博士，現任中央研究院天文及天文物理研究所籌備處副研究員。
- Ming-Jye Wang received his Ph.D. in physics from National Tsing Hua University. He is currently an associate research fellow in the Institute of Astronomy and Astrophysics, Academia Sinica.