

多頻率距離成像法觀測電離層電漿不規則體和流星軌跡之可行性研究

陳振雄^{*a}、朱延祥^b、蘇清論^b、王建亞^c
中國醫藥大學通識教育中心^a
國立中央大學太空科學研究所^b
中國文化大學光電物理系^c

摘要 — 本研究探討多頻率之距離成像法，並應用於觀測大氣電離層電漿不規則體和流星軌跡之徑向分布，藉以提高其距離解析度。分析的資料來自日本京都大學 MU 特高頻陣列雷達之實地觀測，觀測時輪流使用 5 個頻率 (46.250、46.375、46.500、46.625、46.750MHz) 於連續發射之脈波，5 個頻率之回波組合再以 Capon 非線性演算法來反演雷達照射體積內之回波強度在距離上的分布，藉此呈現電漿不規則體和流星軌跡之小尺度結構與變化，將有助於進行電離層微觀尺度之動力分析。¹

一、簡介

特高頻(VHF)陣列雷達和極高頻(UHF)雷達可使用於大氣各種現象之研究，探測高度可由數百公尺之邊界層到數百公里之電離層 [1][2]。目前大氣 VHF 和 UHF 雷達採用脈波發射電磁波，但是脈波式雷達必定有一個空間解析度(徑向和橫向)的限制，欲提高徑向解析度，脈波必須縮短，此舉將減少發射功率，降低觀測高度，不過仍可透過相位加碼技術來提升發射功率和探測高度。由於大氣 VHF 和 UHF 雷達在目前技術上會因硬體和訊號處理速度等問題，其徑向解析度大多在百米以上。為了提升雷達回波之徑向解析度達數十米甚至數米之程度，多頻率觀測技術和相關演算法乃被加以應用，稱爲「距離成像法(range imaging/RIM)」[3]。本文探討 RIM 在 VHF 雷達上的應用。

RIM 已使用於低層中性大氣之觀測，本研究則嘗試將 RIM 推展至電離層之電漿不規則體觀測。由於電離層之雷達回波特性和低層中性大氣不一樣，因此 RIM 之可行性須加以驗證。目前世界上已有多座大氣 VHF 陣列雷達具有多頻率觀測技術，本文所分析之資料來源爲日本 MU 雷達 (34.85°N, 136.10°N；由京都大學所建立和管理)，觀測時間爲 2012 年 11 月 26 日 17:00 LT 至 11 月 27 日 08:00 LT。由於電離層電漿不規則體通常是沿著地球磁力線排列 (Field-aligned irregularities/FAI)[4]-[8]，雷達波束必須垂直於地球磁力線才能收到較強的回波。因此，本觀測之雷達波束設定爲傾斜天頂角 51°，朝地理正北方向。此方向大致與 100 公里高度之地球磁力線垂直。本觀測發射 600 公尺長之脈波，脈波間隔(IPP)爲 1.5 ms，並輪流使用 5 個頻率(46.250、46.375、46.500、46.625、46.750MHz)，

因此每一頻率之資料取樣時間約爲 7.5 ms。回波接收過程中啓用 20 個接收通道，包含整個天線陣列場接收和分割陣列場後的 19 個接收天線組，但因本研究主要是探討距離成像法，所以只使用整個天線陣列場接收的資料。雷達波束寬在南北和東西方向分別約爲 5.4° 和 4.6° (two-way -3dB 的寬度)，因此雷達脈波照射的空間尺度爲徑向上 600 公尺，垂直於徑向之切面寬度則爲 8~10 公里。由於 FAI 回波之方向靈敏度(aspect sensitivity) 極高，回波主要來自於垂直磁力線之方向，所以較寬廣的切面範圍不太會影響距離成像之結果。本研究之成像分析使用 Capon 演算法[3]，此演算法可有效處理多維度訊號且較爲省時，但是隨著訊雜比值(signal-to-noise ratio/SNR)的降低，解析效果會減弱。

二、距離成像法

距離成像法(RIM)基本上是干涉法(interferometry)的一種。對於同一目標物，不同脈波載頻之回波相位會有些差異，令 $\mathbf{s}(t)$ 代表 n 個載頻脈波所得訊號的欄向量(column vector)， \mathbf{w} 表示具有 n 個元素之濾波向量。透過 \mathbf{w} 對 $\mathbf{s}(t)$ 的濾波動作，可得到一個輸出爲

$$y(t) = \mathbf{w}^+ \mathbf{s}(t) \quad (1)$$

其中符號 + 表示複數之共軛加上轉置之動作(conjugate+transpose)，也就是 Hermitian 運算子。濾波向量 $\mathbf{w} = [e^{j2k_1 r} \ e^{j2k_2 r} \ \dots \ e^{j2k_n r}]^T$ ，與徑向距離 r 有關， k_n 是第 n 個載頻之波數(wavenumber)。若 $y(t)$ 特性符合隨機訊號中的 wide-sense stationary 特性，即均勻(homogeneous)、定常(stationary)與均向(isotropic)特性等，則其自相關函數(autocorrelation function)可表達爲

$$R_y(\tau) = \langle y(t+\tau) y^*(t) \rangle \quad (2)$$

其中 τ 是延遲時間，*是複數共軛， $\langle \rangle$ 代表族群平均運算。將(1)代入(2)，經由適當的運算之後，可得

$$R_y(\tau) = \mathbf{w}^+ \mathbf{R}(\tau) \mathbf{w} \quad (3)$$

其中 $\mathbf{R}(\tau)$ 是 $\mathbf{s}(t)$ 的相關函數矩陣，大小爲 $n \times n$ 。若不區分具有不同都卜勒速度的個別目標物，則 Capon 演算法之距離成像運算式可簡化爲

$$B(r) = \frac{1}{\mathbf{e}^+ \mathbf{R}_0^{-1} \mathbf{e}} \quad (4)$$

¹ 本研究由國科會贊助，計畫編號 MOST 103-2111-M-039-001。

$B(r)$ 是在距離 r 之亮度分布，可代表回波功率之大小， \mathbf{e} 和 \mathbf{w} 有相同的型式，即 $\mathbf{e}=[e^{i2k_1r} e^{i2k_2r} \dots e^{i2k_n r}]^T$ ， \mathbf{R}_0 是沒有時間延遲 ($\tau=0$) 之相關函數所組成之矩陣，形式為

$$\mathbf{R}_0 = \begin{bmatrix} V_{11} & V_{12} & \dots & V_{1n} \\ V_{21} & V_{22} & \dots & V_{2n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ V_{n1} & V_{n2} & \dots & V_{nn} \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中 V_{ij} 為沒有時間延遲之二組訊號互相關函數，而且是一對脈波載頻波數差 Δk 之函數，

$$V_{ij}(\tau=0, \Delta k) = \langle V_i V_j^* \rangle \quad (6)$$

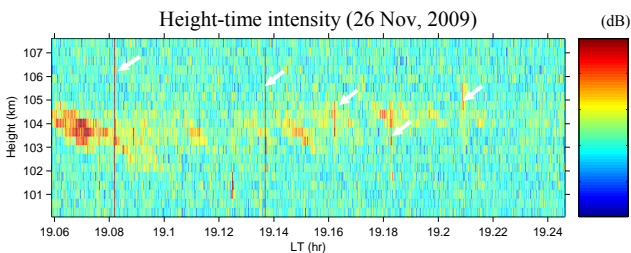
V_i 是第 i 個載頻所對應之時間序列訊號。式(4)-(6)為本研究之資料分析所使用之運算式。

三、觀測分析

3.1 訊號校正分析

式(4)之計算結果為理想值，實際上須進一步考慮距離權重函數效應(range-weighting function effect)以修正 $B(r)$ 值。此外，因訊號運行和處理之時間延遲也會導致各載頻回波之相位偏移，須加以補償才能回覆可讀之距離-亮度分布圖。這些校正過程都可使用 [9] 所提出之方法，本文不再贅述，但附錄中簡單說明其理念與過程。簡言之，該校正方法可以得出一代表性的高斯型距離權重函數，其標準偏差和訊雜比(SNR)有關，同時也可以估算出訊號在行進和處理過程中之時間總延遲量。圖一是本文所分析之雷達回波圖，可以清楚看到傾斜的回波區塊，這就是電離層中沿著磁場分布的不規則體(Field-align irregularities/FAI)。

另有瞬間出現的強烈回波，穿越幾個取樣層高度，如白色箭號所指示之處。這些回波來自流星進入大氣層燃燒後之離化氣體，其回波軌跡型態與 FAI 不一樣，將於 3.3 節呈現。



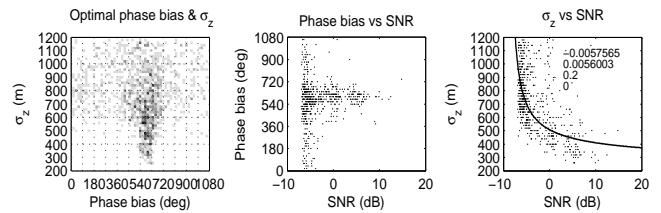
圖一：場沿不規則體(FAI)之回波功率圖，高度解析度約為 377 公尺，時間解析度為 0.96 秒。

圖二是以 [9] 所提出之方法得出之校正結果。最左邊方圖中，縱坐標之 σ_z 是高斯型距離權重函數， $W(r_d)$ ，之標準偏差 (r_d 是以取樣層中心為參考點之徑向位置)，橫坐標之相位偏差(phase bias)代表回波訊號之時間總延遲量，每 360° 對應 $2 \mu s$ 之時間延遲。此時間總延遲量

在 SNR 很低時計算值並不固定，但是隨著 SNR 的提高而收斂於某特定值，如圖二中間的方圖所示，收斂值約為 580° ，因此，本觀測案例之訊號時間延遲約為 $580^\circ/360^\circ \times 2 \mu s = 3.22 \mu s$ ，此延遲量可用於修正回波之取樣距離。另外，參數 σ_z 與 SNR 則呈現反比的關係，如圖二最右邊方圖所示，隨著 SNR 逐漸增大， σ_z 逐漸趨近於一個最小值。經過湊配， σ_z 與 SNR 的關係可以用下方方程式表達：

$$\sigma_z = \frac{1}{\frac{a}{(SNR+10)^c + b}} - d \quad (7)$$

其中 a 、 b 、 c 、 d 為一組最佳湊配參數，數值顯示於圖二最右邊圖區中，由上往下對應之，圖中之實線曲線則是(7)之結果。式(7)並非唯一可用的型式，任何符合 σ_z 與 SNR 關係的函數皆可利用。



圖二：RIM 之校正過程所得出之各參數關係圖。 σ_z 是高斯型距離權重函數之標準偏差，phase bias 代表回波訊號之時間總延遲量，每 360° 對應 $2 \mu s$ 之時間延遲，SNR 為訊雜比值，最右邊小圖之四個數字是 σ_z 和 SNR 關係式之常數，其關係式如實線所呈現。

將式(7)代入下面的式(8)，可用於修正距離權重函數對於亮度分布值所造成的加權影響：

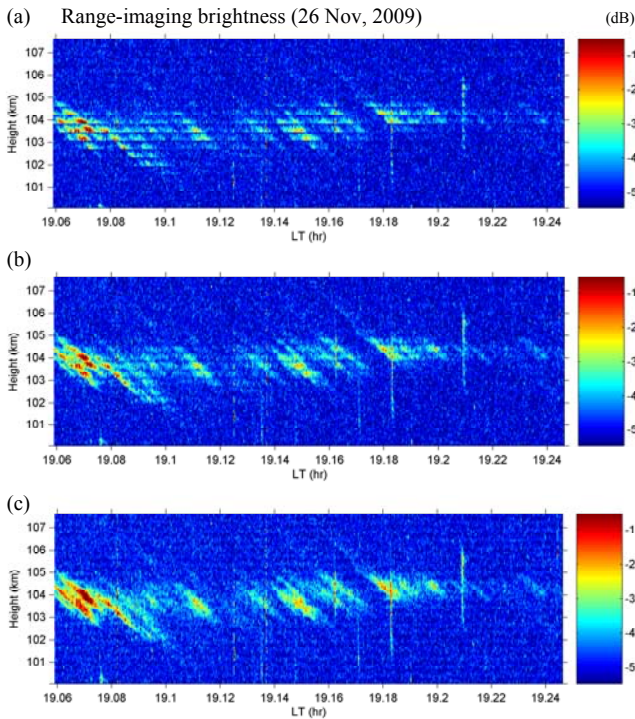
$$W(r_d) \cong \exp\left(-\frac{r_d^2}{\sigma_z^2}\right) \quad (8)$$

也就是，式(4)除以式(8)即為所求之亮度值。

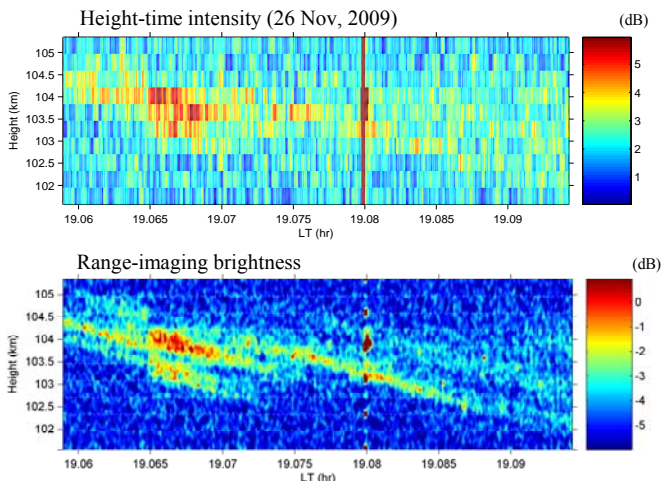
3.2 觀測實例-電離層場沿不規則體

圖三是對應圖一回波的距離成像結果，每四公尺即計算一亮度值。首先，若未經任何校正，則各取樣層之亮度分布會有明顯的不連續，如圖(a)所呈現。若考慮時間延遲量來修正回波距離，則如圖(b)所示，惟取樣層邊界仍出現不連續性，以至於各取樣層內出現塊狀回波。最後，補償距離權重函數之加權效應後，圖(c)呈現完整的 FAI 回波，相較於圖一之原始回波功率圖，距離成像後的 FAI 結構變得更清楚可讀。由此觀測案例可說明 RIM 確實可用於電離層電漿不規則體之觀測。

圖四為圖三之局部放大圖，上圖為回波功率，下圖為距離成像。很明顯地，RIM 可解析出小尺度的 FAI 結構，即使這些 FAI 結構之尺度小於取樣層的範圍 (~600 公尺)。由此可見，應用 RIM 於電離層不規則體之小尺度動力變化研究是極為可行的。



圖三：場沿不規則體(FAI)之距離成像結果。(a)圖未經任何校正；(b)圖經過延遲時間之校正，但尚未修正距離權重函數之加權影響；(c)圖為完全校正之結果。



圖四：場沿不規則體(FAI)之距離成像局部放大圖。

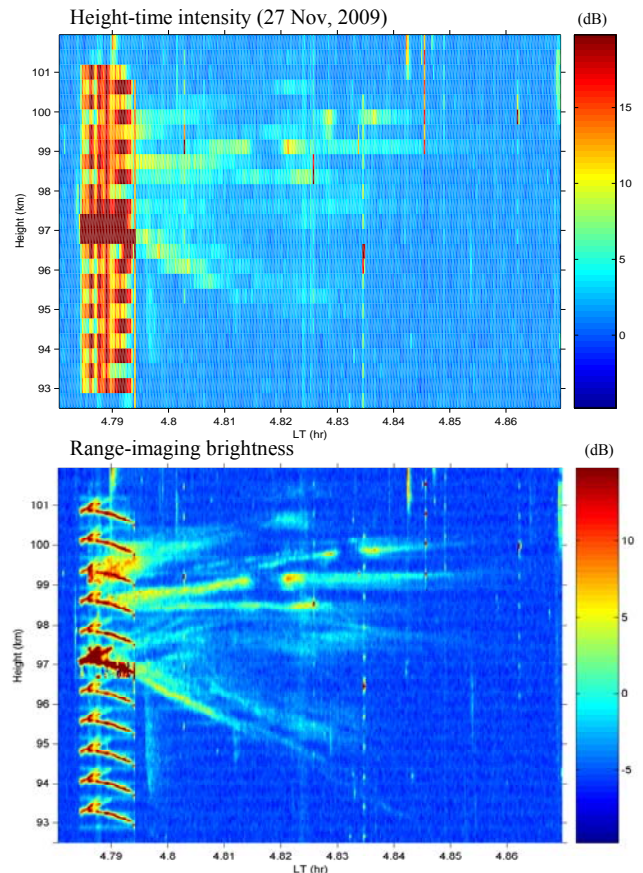
3.3 觀測實例-流星軌跡

流星進入高層大氣層之後因摩擦燃燒等因素逐漸游離形成一條離子體軌跡 (meteor trail)，可以像 FAI 一樣反射或散射雷達波[10]-[13]。透過回波分析和參數計算，可推算高層大氣的特性(例如擴散率、密度)和風場，尤其是針對中氣層(mesosphere)之高度範圍。因此，若能解析出流星軌跡之小尺度變化過程，應該會有助於提取當地大氣特性參數之精確度。

圖五為實際觀測之案例，上圖為回波功率，下圖為距離成像。由於本觀測使用 13 bits 之 Barker 碼進行脈波加碼以提高 SNR 值，但是解碼後的旁波瓣非常明顯，使得部分強回波會洩漏到隔層之取樣層，形成假

回波，此現象在距離成像後的亮度分布圖中可更清楚地檢視出來，本觀測案例中回波之洩漏主要發生在時間點 4.79 小時附近。回波洩漏情況是相位加碼/解碼後經常出現的結果，為壓抑此現象，可加大編碼長度，但雷達脈波也必須加長，其可行性受限於雷達系統之性能。一般特高頻大氣雷達可使用長度達 13 bits 之 Barker 碼或 16 bits 之互補碼。以本觀測為例，雷達脈波長度為 52 μ s，經加碼/解碼後產出 4 μ s 脈波長，相當於 600 公尺之距離解析度。另外，也可以使用更先進的加碼技術，例如 Spano code，但須要使用更多組脈波來解碼，取樣時間因而拉長。Spano code 已可利用於低層大氣之觀測，但對於電離層高度而言，因電漿不規則體不僅變化快速、移行速度可達每秒 100 公尺以上，因此取樣時間過長將不利於反演風場和回波之特性。

圖五顯示流星約在當地時間 4.79 小時進入雷達波照射區域，高度約在 97 km，此時回波最為強烈。有趣的是流星離化軌跡之回波呈現輻射狀，RIM 之後可更清楚觀察到幾條流星離化軌跡分別朝不同方向行進：高度 97 km 以下之一條主要軌跡朝雷達站方向靠近，高度 98.5 km 之軌跡則呈現水平和向上方向(遠離雷達站)。根據如此輻射狀的流星軌跡，推斷本流星體在降落過程中有爆炸和碎裂的情況，各破碎塊朝不同方向行進和持續離化而形成輻射狀。至於各離子體軌跡之移行速度和方向，需要進一步以都卜勒速度進行風場分析，但此項不在本次之研究主題內。



圖五：流星及其離化軌跡。雷達脈波以 13-bit Barker 碼進行加碼以提高 SNR 比值，但是解碼之後的旁波瓣非常明顯。

結論

本文探討大氣特高頻陣列雷達之多頻率距離成像法(RIM)，並嘗試將之應用於電離層場沿電漿不規則體(FAI)和流星離化軌跡之觀測。本研究以可適性的Capon法得出回波之距離分布，進而觀察回波隨距離和時間之小尺度變化(距離解析度可達公尺之等級)。由於FAI和流星離化軌跡之特性、空間結構等與中性大氣之不規則體(即亂流)不一樣，RIM之可用與否必須經過測試和適當的校正。校正方法是採用[9]所提出之演算過程，不僅可獲得回波訊號之時間延遲量，也可得出隨著訊雜比(SNR)而變化之距離權重函數效應。透過這些參數和效應的修正，FAI回波之距離分布更為精細和可讀。另外，流星的離化軌跡之成像則呈現遠離和靠近觀測點之情景，說明流星在下降過程中可能發生爆炸和碎裂，各破碎塊朝不同方向行進和持續離化。後續將再結合多接收機之成像法，反推回波之來向角及三維空間結構，這些小尺度結構之時序變化對於太空天氣和電離層反應地震現象的預測等或許有潛在的參考性，值得未來持續觀測和深入探討。

附錄

距離權重函數起因於雷達接收系統之濾波過程，是濾波響應函數和雷達脈波形狀之迴旋積(convolution)。此函數在理論上是對稱於取樣層之中心點，並且近似於高斯函數，如第(8)式之型式。RIM所得出的亮度值(即回波強度)在相鄰的上下取樣層邊界附近理應相近，藉由此簡單觀念，在成像之演算過程中代入不同的距離權重函數(即 σ_z 值)和時間延遲量來計算和修正亮度值，再比較相鄰取樣層邊界附近重疊區域的亮度值，通常可得到一個最佳的 σ_z 值和時間延遲量。計算過程是利用「最小均方差(minimum mean square error)」運算子，如式(9)所示：

$$E = \sum_{i=1}^N \frac{(P_{1i} - P_{2i})^2}{P_{1i}P_{2i}} = \sum_{i=1}^N \left(\frac{P_{1i}}{P_{2i}} - 2 + \frac{P_{2i}}{P_{1i}} \right) \quad (9)$$

其中 N 是取用之亮度值點數， P_{1i} 和 P_{2i} 為二取樣層邊界附近重疊區域內之亮度值。在計算(9)之 E 值時，不同的時間延遲量和 σ_z 值所得出之 P_{1i} 和 P_{2i} 會產生不同的 E 值。當 $P_{1i}=P_{2i}$ 時， $E=0$ ；若 $P_{1i} \neq P_{2i}$ 時， $E>0$ ，而且當 P_{1i} 和 P_{2i} 差異越大時， E 值也會越大。因此，必有一組 σ_z 值和時間延遲量可使 E 值最小，此組參數值即視為最佳可用的校正值。

誌謝

本研究之觀測資料由日本京都大學 MU 雷達站所提供，該雷達站由京都大學生存圈研究所(RISH)經營與管理。感謝 RISH 之 J. Furomoto 博士協助觀測。

參考文獻

- [1] R. F. Woodman and A. Guillen, "Radar observations of winds and turbulence in the stratosphere and mesosphere," *J. Atmos. Sci.*, 31, 493-505, 1974.
- [2] R. F. Woodman and C. LaHoz, "Radar observations of F region equatorial irregularities," *J. Geophys. Res.*, 81, 5447, 1976.
- [3] R. D. Palmer, T.-Y. Yu, and P. B. Chilson, "Range imaging using frequency diversity," *Radio Sci.*, vol. 34, 1485-1496, 1999.
- [4] S. Fukao, J. P. McClure, A. Ito, T. Sato, I. Kimura, T. Tsuda, and S. Kato, "First VHF radar observation of midlatitude F region field-aligned irregularities," *Geophys. Res. Lett.*, 15, 768-771, 1988.
- [5] M. Yamamoto, S. Fukao, R. Woodman, T. Ogawa, T. Tsuda, and S. Kato, "Mid-latitude E rRegion field-aligned irregularities observed with the MU radar," *J. Geophys. Res.*, 96(A9), 15943-15949, 1991.
- [6] Y.-H. Chu and K.-F. Yang, "Reconstruction of spatial structure of thin layer in sporadic E region by using VHF coherent scatter radar," *Radio Sci.*, 44, RS5003, doi:10.1029/2008RS003911, 2009.
- [7] C.-J. Pan and P. S. Brahmanandan, "Range rate variation studies of the low-altitude quasi-periodic radar echoes with SEEK-2 campaign," *Indian Journal of Radio & Space Physics*, 38, 50-56, 2009.
- [8] C.-Y. Wang, Y.-H. Chu, C.-L. Su, R.-M. Kuong, "Statistical investigations of layer-type and clump-type plasma structures of 3-meter field-aligned irregularities in nighttime sporadic E region made with Chung-Li VHF radar," *J. Geophys. Res.*, 116, A12311, doi:10.1029/2011JA016696, 2011.
- [9] J.-S. Chen and M. Zecha, "Multiple-frequency range imaging using the OSWIN VHF radar: Phase calibration and first results," *Radio Sci.*, vol. 44, RS1010, doi:10.1029/2008RS003916, 2009.
- [10] Lau, E. M., Avery, S. K., Avery, J. P., Janches, D., Schafer, S. E. P. R., and Makarov, N. A., "Statistical characterization of the meteor trail distribution at the South Pole as seen by a VHF interferometric meteor radar," *Radio Sci.*, 41, RS4007, doi:10.1029/2005RS003247, 2006.
- [11] Y.-H. Chu, and C.-Y. Wang, "Interferometry observations of VHF backscatter from plasma irregularities induced by meteor in sporadic E region," *Geophys. Res. Lett.*, 30(24), 2239, doi:10.1029/2003GL017703, 2003.
- [12] L. P. Dyrud, J. Urbina, J. T. Fentzke, E. Hibbit, and J. Hinrichs, "Global variation of meteor trail plasma turbulence," *Ann. Geophys.*, 29, 2277-2286, doi:10.5194, 2011.
- [13] C. Schult, G. Stober, J. L. Chau, and R. Latteck, "Determination of meteor-head echo trajectories using the interferometric capabilities of MAARSY," *Ann. Geophys.*, 31, 1843-1851, doi:10.5194, 2013.