

# 電磁波傳遞對作戰之影響-以大氣導管為例

宋偉國

空軍航空技術學院軍事氣象系

## 摘要

電磁波的傳遞可以用於通訊以及探測物體目標，對於作戰有重要效應，然而電磁波在大氣中的傳遞，會受到大氣影響產生折射，可能使電磁波偵測目標發生誤差。本研究以大氣導管為研究目的，嘗試建立臺灣地區大氣導管現象。由於ERA5已建立大量逐時、逐月各地大氣導管資料庫，如果能用臺灣地區探空資料求出的大氣導管去校驗ERA5，並修正ERA5在臺灣地區的資料庫，未來即可使用ERA5的修正值建立臺灣大氣導管資料庫。本文先採用ERA5月平均資料計算1,4,7,10月大氣導管底部，顯示冬季大氣導管底部之高度較低，夏季則較高。本文亦以AREPS軟體套用探空觀測數據求取大氣導管情形，個案顯示臺灣冬季個案出現大氣導管，夏季個案則無出現導管現象。唯比對ERA5模式，ERA5顯示近地層應有幾百公尺高的大氣導管，但探空觀測資料並無顯示有大氣導管現象，此可能是本文目前用用的探空觀測垂直解析度僅數百公尺一筆資料，而大氣導管可能發生在近地層幾百公尺以內，未來應可使用近地面探空高解析度資料計算大氣導管，作為修正ERA5的大氣導管資料庫，運用修正之ERA5資料配合臺灣探空資料建立臺灣地區與周邊海域大氣導管資料庫。

**關鍵字：**大氣導管、ERA5

## 1. 前言

通訊、監測是現代化戰爭決勝的關鍵，電磁波除作為通訊工具外，雷達發射電磁波偵測目標物，對於作戰更是有直接影響。然而電磁波在大氣中傳遞時，會受到大氣環境與地球曲率影響，造成電磁波偵測目標失真，對於作戰目標產生誤判。例如2000年10月美國與日本舉行聯合軍事演習，當小鷹號航空母艦在日本海執行任務時，俄羅斯SU27戰機利用小鷹號航艦上空出現的大氣導管現象（Atmospheric Duct: AD）形成的雷達盲區，對小鷹號進行多次偵察拍照，但美軍航艦戰鬥群內含神盾的一切偵蒐系統均未發現俄羅斯戰機。武器載具如戰機、船艦運用大氣導管而匿蹤，可以對戰場武力投射造成重大影響，相對的，運用大氣導管也可能延伸雷達偵測距離，烏克蘭於2019年出口「礦物-ME」

（Mineral-ME）射控雷達至美國，「礦物-ME」對海射控雷達，透過大氣導管效應，為反艦飛彈進行超地平線偵測與射控導引（引自青年日報2021年1月2日）。

大氣導管是透過大氣使電磁波產生折射現象而造成次折射、超折射、捕陷現象，對目標物的偵搜產生誤差或延展偵蒐距離。除了大氣導管現象對於雷達偵蒐目標的影響外，水面水氣蒸發顯著，造成大氣密度垂直分布差異，大氣導管現象並不少見。

大氣導管現象在學術界已有許多研究，例如Huang et al.(2022)分析熱帶氣旋情境中的大氣導管現象；Von (2004)探討ECMWF求出大氣導管的氣候特徵；Sun et al. (2016)探討湖面環境下在穩定大氣中的大氣導管現象；Turton et al.(1988)介紹無線電傳輸時的大氣導管現象；Pan et al.(1996)在中國東南海域預

報大氣導管；Ding et al.(2013)從熱帶氣旋的 GPS 投落送系統觀測大氣導管；Shi et al.(2019)討論西北太平洋颱風伴隨的蒸發導管現象。國內學者蔡世樵(2012)則曾提到中共船艦運用大氣導管發展超視距系統於驅逐艦上。

學界關於大氣導管的研究，多數探討何種天氣條件造成大氣導管，國內亦有探討各季節運用探空資料分析大氣導管。另外，蔡(2012)則介紹大氣導管在作戰上的應用。然而國內大氣導管研究資料比較少採用 ECMWF 的 ERA5 大氣導管的資料庫，由於 ERA5 已建立長期而大量的大氣導管資料，本文目的嘗試結合 ERA5 大氣導管資料庫，應用於臺灣天氣系統情境之大氣導管現象，本文透過探空大氣溫度、濕度、氣壓資料的分析，探討那些天氣形態下造成大氣導管現象，進一步透過 ERA5 的產品，可以做為臺灣大氣導管分布區域的研判，未來提供作戰單位之戰場氣象情資需求。

## 2. 資料收集與處理

本研究使用中央氣象局天氣圖、日本氣象廳資料，分析綜觀環境及大氣導管發生區域。使用海軍大氣海洋局提供的 Advanced Refractive Effects Prediction System (AREPS)3.03 版計算大氣折射率，並用 ERA5 資料大氣導管底部(Duct base height)分析大氣導管季節分布情形。另外，高空資料除使用氣象局、空軍氣象聯隊探空資料外，亦使用美國懷俄明大學 University of Wyoming 的資料，該資料隨時更新於網站，並可顯示斜溫圖與原始電碼，對於繪製斜溫圖與套用 TTBB 資料於 AREPS 相當方便。

## 3. 大氣導管理論概述

大氣折射原理源自司乃耳定律用，光速在不同介質有不同速度(圖1)，真空時的光速  $3 \times 10^8 \text{ms}^{-1}$ ，進入水中的速度會減小，因此會偏向與界面垂直的法線。電磁波在穿越大氣

層時，因為空氣密度隨著高度變化所產生的偏折。這種折射是光通過空氣時因為密度的改變使電磁波速度改變而產生折射現象，例如海市蜃樓就是入射角到達臨界值造成全反射的現象(圖2)。

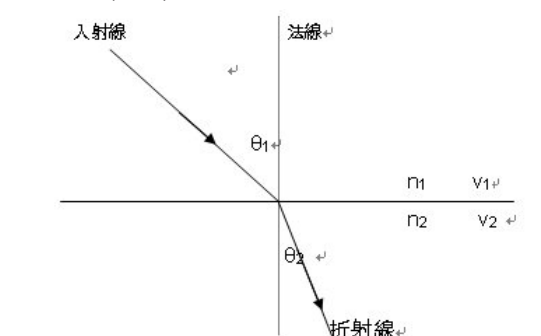


圖1 司耐耳定理示意圖。

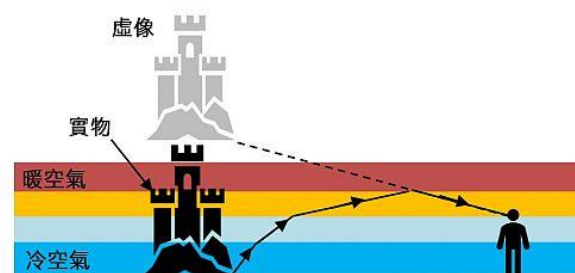


圖2 大氣折射產生海市蜃樓示意圖。

電磁波發射信號後，如果沒有發生折射效應時，電磁波將沿著直線進行，但真實大氣受到溫度、水氣影響產生折射現象，當雷達電磁波與目標物距離夠遠時，地球曲率效應必須考量，不同大氣條件下，大氣折射條件產生電磁波傳遞情形如圖3所示。

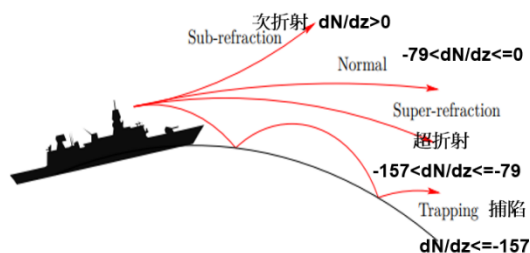


圖3 雷達發射電磁波產生大氣折射情形。

當電磁波偵測目標物時，目標物可以運用大氣導管現象使雷達偵測失真，或是防守方利於捕陷現象長距離偵蒐目標物，雷達電磁波折射條件與偵蒐目標物相關示意圖如圖4所示。

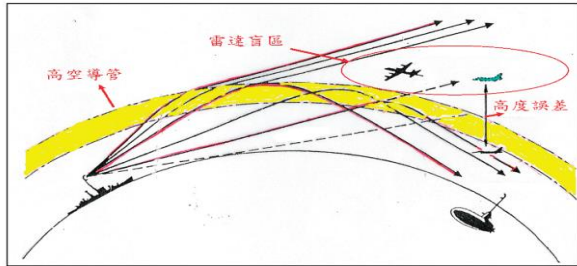


圖4 電磁波折射與目標物偵測相關示意圖(引自朱等, 1994)。

發生當雷達的電磁波發射後，大氣上下層密度出現差異，造成大氣折射率 $N$ 垂直高度 $Z$ 的差異。大氣折射率 $n$ 數學式如(1)所示， $c_0$ 微光在真空中速度， $v$ 為介質中的光速，大氣折射率 $n$ 與溫度 $T$ 、氣壓 $p$ 、水氣壓 $e$ 有關。

$$n = \frac{c_0}{v} = 1 + \frac{77.6}{T} \left[ p + \frac{4810e}{T} \right] \times 10^{-6} \quad (1)$$

為方便評估大氣折射現象，另外定義折射指數 $N$ 如(2)所示：

$$N = (n - 1) \times 10^6 = \frac{77.6}{T} \left[ p + \frac{4810e}{T} \right] \quad (2)$$

考慮大氣折射指數與地球曲率關係，表1顯示折射指數隨高度變化發生次折射(Sub-refractive)、正常情況(Normal)、超折射(Super-refractive)及捕陷(Trapping)發生的條件。

表1 折射指數垂直變化與大氣折射相關條件。

Condition	$dN/dz$ (N-unit/km)	$dM/dz$ (M-unit/km)
Sub-refractive	$0 < dN/dz$	$157 < dM/dH$
Normal	$-79 < dN/dz \leq 0$	$79 < dM/dH \leq 157$
Super-refractive	$-157 < dN/dz \leq -79$	$0 < dM/dH \leq 79$
Trapping	$dN/dz \leq -157$	$dM/dH \leq 0$

當 $\Delta N/\Delta Z$ 為正值，表示 $N$ 隨著高度增加，電磁波隨高度傳遞速度減小、大氣密度隨高度增加，這種情況時波會朝向法線偏折，訊號會向上偏折，此為「次折射」(sub-refraction)；反之 $\Delta N/\Delta Z$ 為負值，大氣密度隨高度減小，甚至比-79更小時，則電波訊號會向下偏折，此為「超折射」(super-refraction)；當超折射比地球曲率效應更顯著時，即 $\Delta N/\Delta Z < -157$ 時，將產生捕陷現象。

#### 4. 天氣系統與大氣導管相關性

大氣發生逆溫時，密度隨高度減小，有機會發生大氣導管現象。ERA5 求出2022年1月、4月、7月、10月之月平均大氣導管底部高度如圖5所示，顯示1月、10月代表冬季季節臺灣大氣導管高度在150公尺以下，冬季臺灣冷空氣南下時，近地層常出現輻射逆溫，因此大氣導管容易出現於低層大氣。4月、7月偏向夏季時期時，臺灣地區大氣導管出現高度仍低，然而臺灣周圍海域大氣導管高度到達300公尺以上，透過大氣導管高度的偵測，可以利於雷達掃描策略之運用。

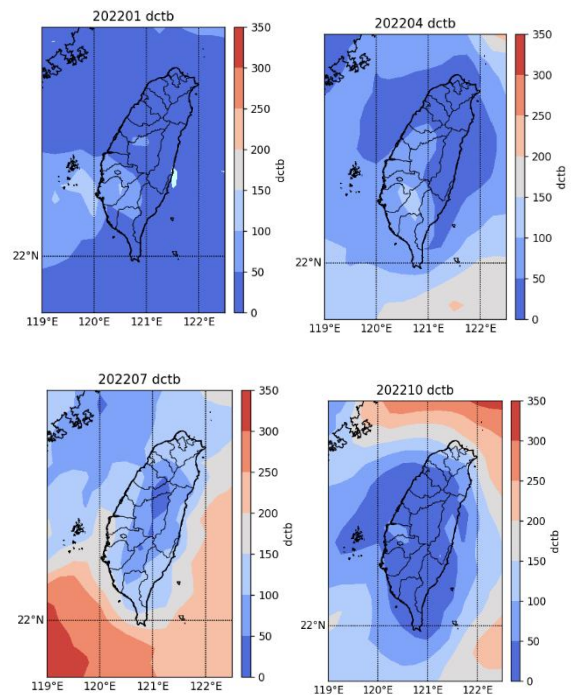


圖5 2022年ERA5求出1月、4月、7月、10月之月平均大氣導管底部高度。

在個別天氣系統之大氣導管特性而言，圖6為2023年2月14日清晨冷鋒經過臺灣地區，彭佳嶼地區溫度下降至14°C(圖略)，並伴隨降雨。由於University of Wyoming在臺灣附近僅提供沖繩探空資料，故本文選用靠近臺灣東北海附近的沖繩作為探空代表，2023年2月13日0000 UTC沖繩探空站顯示800 hPa附近已經有逆溫現象(圖7)，在1557公尺溫度僅11.8 °C，而1707公尺溫度升高至13.2 °C，顯示1557-1707公尺有逆溫現象，此時N從288.3隨高度降為274.3(圖8)，造成有捕陷發生。2月14日0000 UTC此時探空顯示近地層相當潮溼(圖9)，而折射指數顯示僅於4049公尺處出現超折射現象(圖10)，4041公尺處的逆溫現象則發生次折射，顯然折射指數不僅是溫度效應，濕度也有重要角色。

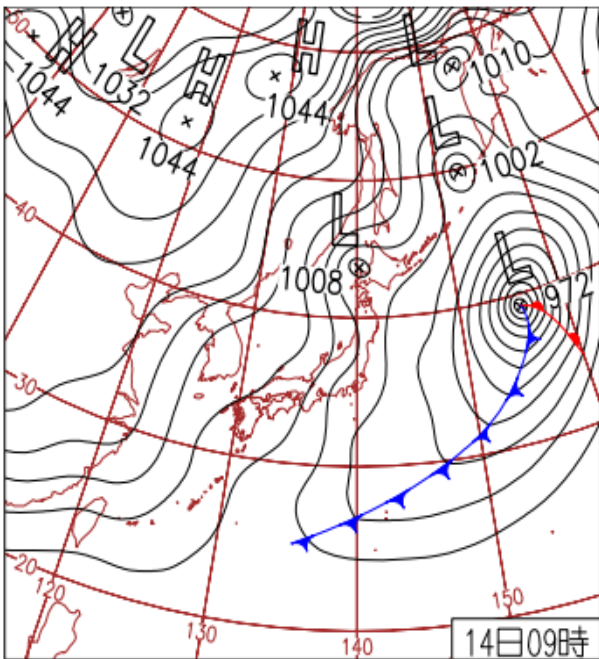


圖6 2023年2月14日0000 UTC地面天氣圖。

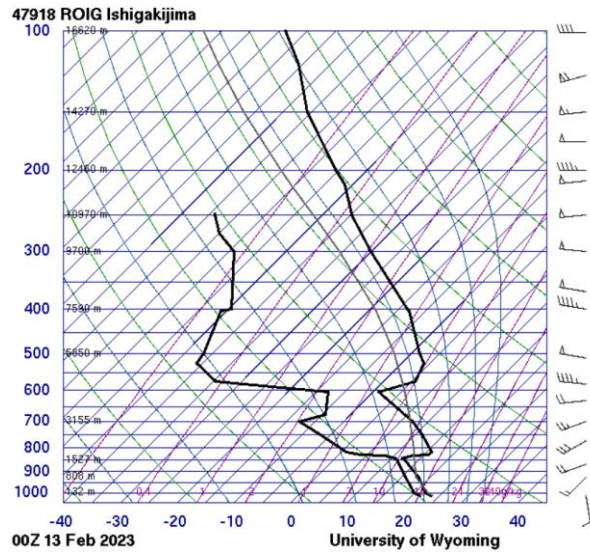


圖7 2023年2月13日0000 UTC沖繩探空圖。

P (mb)	Ta (°C)	Rh (%)	Ht (m)	M (m-unit)	N (n-unit)	Layer
1014.	23.4	88.5	0.00	373.811	373.811	Normal
843.	11.8	92.3	1577.13	535.941	288.331	Super
830.	13.2	71.6	1707.47	542.470	274.396	Trap
826.	15.8	44.6	1748.25	532.085	257.610	Super
818.	16.	36.	1830.76	536.194	248.765	Normal
747.	11.2	27.5	2593.96	627.933	220.682	Normal
676.	4.6	35.3	3416.68	739.632	203.214	Normal
605.	-3.9	49.4	4306.09	861.898	185.841	Normal
575.	0.6	5.2	4710.52	904.006	164.454	Normal
524.	-1.1	3.	5452.86	1006.195	150.096	Normal
404.	-12.9	4.4	7480.12	1295.099	120.721	Normal
274.	-34.9	6.1	10314.46	1708.340	88.969	Normal
249.	-40.1	6.	10974.75	1805.597	82.561	Normal
215.	-46.5	5.	11963.02	1951.375	73.181	Normal
118.	-75.7	5.	15688.79	2508.908	45.768	Normal
100.	-83.9	5.	16626.01	2650.643	40.360	

圖8 2023年2月13日0000 UTC大氣折射指數。

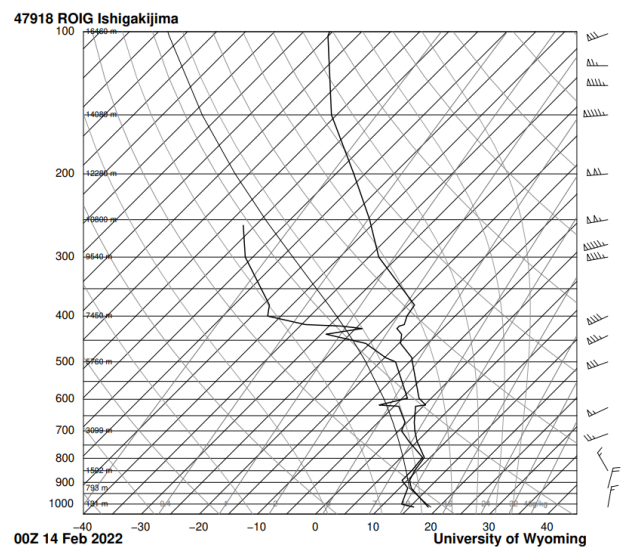


圖9 2023年2月14日0000 UTC沖繩探空圖。

P (mb)	Ta (?C)	Rh (%)	Ht (m)	M (m-unit)	N (n-unit)	Layer
1015.	18.2	85.3	0.00	348.921	348.921	Normal
891.	10.4	91.6	1099.60	470.138	297.502	Normal
797.	9.	98.	2025.63	589.931	271.907	Normal
737.	5.	90.6	2669.08	662.698	243.652	Normal
671.	1.2	89.	3429.37	757.474	219.063	Normal
621.	-1.3	80.6	4049.57	835.471	199.688	Super
617.	0.2	54.8	4101.21	835.836	191.946	Sub
597.	-2.1	86.1	4364.27	878.824	193.634	Normal
490.	-10.3	69.4	5909.54	1082.683	154.885	Normal
457.	-14.7	60.1	6442.01	1154.916	143.520	Normal
437.	-16.1	31.6	6779.89	1199.205	134.762	Normal
425.	-17.9	59.3	6988.85	1231.251	134.002	Normal
420.	-17.9	41.1	7077.34	1242.071	130.930	Normal
417.	-17.3	21.2	7130.99	1247.665	128.099	Normal
379.	-18.9	9.	7844.74	1347.709	116.085	Normal
257.	-40.1	7.8	10616.64	1752.074	85.262	Normal
200.	-51.9	5.	12284.77	1998.398	69.690	Normal

圖 10 2023 年 2 月 14 日 0000UTC 大氣折射指數。

本研究另外選取夏天個案，探討大氣折射指數分布情形。圖 11 為 2023 年 7 月 26 日 0000 UTC，颱風杜蘇芮逐漸移進臺灣南部，臺北板橋探空(圖 12)與沖繩探空(圖 13)均顯示地面出現東南風，二者溫溼度隨高度分布接近，均未出現逆溫現象，此時折射指數均顯示為正常情況(圖 14)。

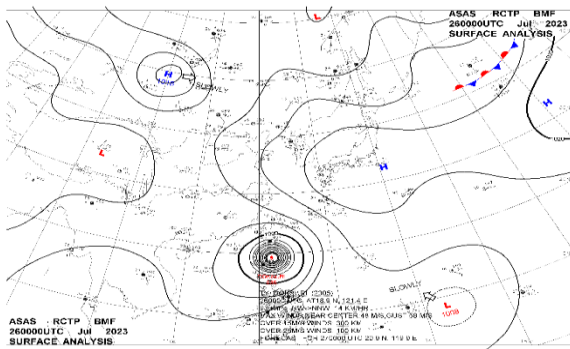


圖 11 2023 年 7 月 26 日 0000 UTC 地面天氣圖。

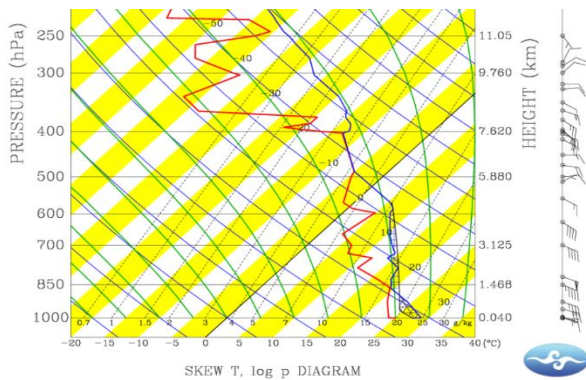


圖 12 2023 年 7 月 26 日 0000 UTC 板橋探空圖。

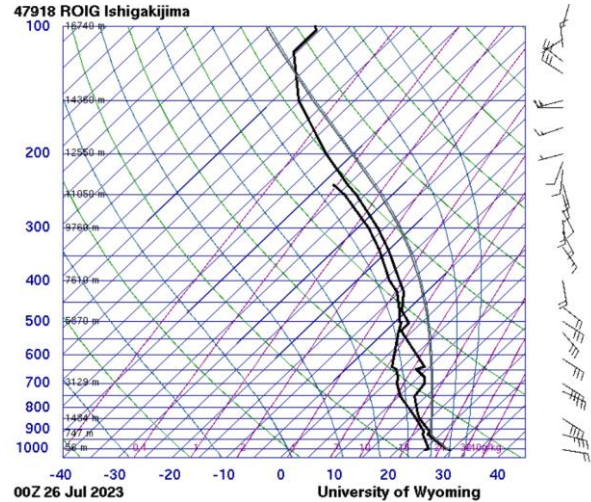


圖 13 2023 年 7 月 26 日 0000 UTC 沖繩探空圖。

P (mb)	Ta (?C)	Rh (%)	Ht (m)	M (m-unit)	N (n-unit)	Layer
1006.	29.6	77.3	0.00	388.819	388.819	Normal
911.	22.4	93.5	873.70	484.870	347.698	Normal
829.	17.	94.4	1686.09	567.654	302.937	Normal
753.	13.	84.2	2500.13	654.179	261.659	Normal
676.	11.	71.2	3403.35	762.048	227.723	Normal
648.	8.	76.8	3754.37	807.092	217.657	Normal
639.	9.	65.9	3869.99	818.708	211.120	Normal
526.	-2.1	96.4	5449.21	1031.515	175.988	Normal
504.	-2.3	90.1	5788.84	1076.642	167.795	Normal
473.	-5.7	96.2	6289.98	1144.558	157.030	Normal
426.	-9.1	90.2	7105.50	1255.284	139.721	Normal
339.	-19.9	85.5	8836.91	1497.183	109.788	Normal
237.	-40.1	76.	11386.04	1867.048	79.441	Normal
115.	-75.5	5.	15946.62	2548.152	44.533	Normal
102.	-75.7	5.	16640.64	2652.023	39.443	

圖 14 2023 年 7 月 26 日 0000UTC 大氣折射指數。

本文透過冬季與夏季個案，計算大氣折射指數，顯示冬季個案出現大氣導管現象，夏季個案則無出現大氣導管。然而 ERA5 月平均資料顯示臺灣四季均有可能出現大氣導管，為確認臺灣是否出現大氣導管，本文選取 2023 年 6 月 30 日個案，分析臺灣大氣導管現象，ERA5 顯示臺灣中北部有大氣導管(圖 15)，大氣導管底層可以到 300 公尺左右。對照沖繩探空計算結果(圖 16)，由於並未出現逆溫，因此並無大氣導管存在。透過觀測資料計算大氣折射指數與 ERA5 模式結果不一致，由於模式顯示大氣導管出現高度不到 500 公尺，但探空觀測資料則垂直解析度則為幾百公尺，顯示需要更高觀測探空資料，才能與模式結

果比對，對於臺灣本島及周邊海域四季之大氣導管現象之驗證。

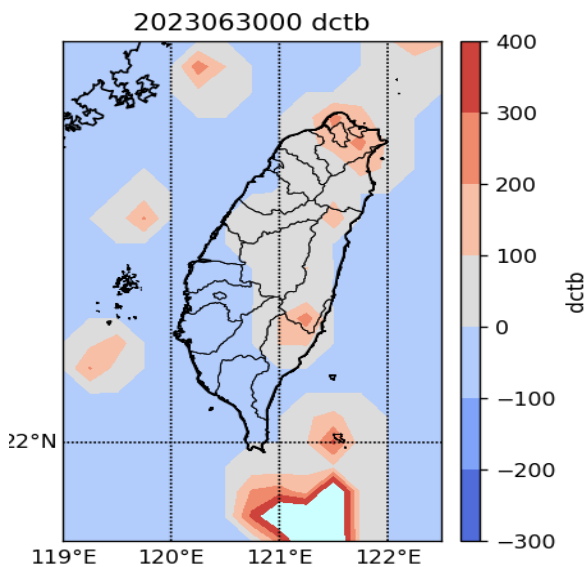


圖 15 2023 年 ERA5 求出 6 月 30 日 0000 UTC 大氣導管底部高度。

P (mb)	Ta (°C)	Rh (%)	Ht (m)	M (m-unit)	N (n-unit)	Layer
1009.	29.4	80.5	0.00	393.891	393.891	Sub
1007.	27.6	91.	17.64	401.768	398.999	Normal
822.	17.6	80.9	1782.46	571.253	291.407	Normal
765.	15.6	67.4	2394.10	634.934	259.060	Normal
714.	13.4	47.1	2976.44	693.542	226.242	Normal
681.	11.8	29.9	3372.90	733.921	204.376	Normal
672.	11.	34.5	3483.91	751.340	204.367	Normal
528.	0.	54.7	5454.25	1022.816	166.500	Normal
452.	-8.7	84.	6679.03	1195.163	146.556	Normal
401.	-13.5	76.7	7598.53	1321.663	128.694	Normal
373.	-16.7	26.	8145.66	1393.854	114.985	Normal
361.	-18.7	53.9	8390.40	1431.395	114.103	Normal
337.	-21.3	27.1	8900.51	1502.646	105.265	Normal
324.	-24.1	47.5	9189.12	1545.772	103.079	Normal
316.	-25.5	25.7	9370.98	1571.097	99.852	Normal
240.	-40.1	23.7	11307.47	1855.049	79.777	Normal
201.	-49.9	5.	12492.35	2030.704	69.405	Normal

圖 16 2023 年 6 月 30 日 0000 UTC 大氣折射指數。

### 5. 結論

本文研究臺灣地區大氣導管現象，用 ERA5 月平均資料計算 1, 4, 7, 10 月大氣導管底部，顯示冬季大氣導管底部之高度較低，夏季則較高，臺灣冬季個案有出現大氣導管，夏季個案則無出現導管現象。唯比對 ERA5 模式，顯示近地層應有幾百公尺高的大氣導管，但探空觀測資料並無顯示有大氣導管現象

，此可能是觀測垂直解析度僅數百公尺一筆資料，而大氣導管則發生在幾百公尺以內，未來應運用近地面探空資料解析度，建立臺灣地區與周邊海域大氣導管資料庫。

### 6. 參考文獻

Ding, J., Fei, J., Huang, X., Cheng, X., Hu, X., 2013, Observational Occurrence of Tropical Cyclone Ducts from GPS Dropsonde Data. *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, 52, 1221–1236.

Huang, L., Zhao, X., Liu, Y., Yang, P., 2022, Analysis of the Atmospheric Duct Existence Factors in Tropical Cyclones Based on the SHAP Interpretation of Extreme Gradient Boosting Predictions. *Remote Sens.*, 14, 3952.

Pan, Z., Liu, S., Guo, L., 2019, The predictions of ducts in south-east coast of China. *Chin. J. Radio. Sci.*, 11, 58–64.

Shi, Y., Zhang, Q., Wang, S., Yang, K., Yang, Y., Ma, Y., 2019, Impact of Typhoon on Evaporation Duct in the Northwest Pacific Ocean. *IEEE Access*, 109111–109119.

Sun, Z., Ning, H., Song, S., Yan, D., 2016, First Observations of Elevated Ducts Associated with Intermittent Turbulence in the Stable Boundary Layer over Bosten Lake, China: Elevated Duct Associated with Turbulence. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 121, 11,201–11,214.

Turton, J. D., Bennetts, D. A., Farmer, S. G., 1988, An introduction to radio ducting. *Meteorol. Mag.*, 117, 245–254.

Von Engeln, A., 2004, A Ducting Climatology Derived from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Global Analysis Fields. *J. Geophys. Res.*, 109, D18104.

- 蔡世樵，2012，海洋上大氣環境對海軍防空作戰之影響。海軍學術雙月刊, 46(5)。
- 朱延祥、許舜清、呂芳川、丁珏、江火明，1994，臺灣地區大氣導管特性之研究。第三屆國防科技研討會論文集。

# The Effect of Electromagnetic Wave Transmission on Warfare - An Example of an Atmospheric Ducting

Wei-Kuo Soong

Department of Military Meteorology, Air Force Institute of Technology

## Abstract

The transmission of electromagnetic waves can be used for communication and detection of object targets, which has an important effect on warfare. However, the transmission of electromagnetic waves in the atmosphere is affected by atmospheric refraction, which may cause errors in the detection of targets by electromagnetic waves. In this study, we try to establish the atmospheric ducting phenomenon in Taiwan. Since ERA5 has built up a large number of atmospheric conduit databases on an hour-by-hour and month-by-month basis, if the atmospheric conduits derived from the sounding data in Taiwan can be used to calibrate ERA5 and correct the ERA5 database in Taiwan, the corrected values of ERA5 can be used to build up an atmospheric ducting database in Taiwan in the future. In this paper, the monthly average data of ERA5 is used to calculate the bottom of the atmospheric ducts in January, April, July and October, which shows that the height of the bottom of the atmospheric ducts is lower in winter and higher in summer. In this paper, we also use the AREPS software to obtain the atmospheric conduit scenarios from the sounding data, and the cases show that atmospheric ducting are more likely to occur in Taiwan in winter and less likely to occur in summer. However, comparing with the ERA5 model, ERA5 shows that there should be several hundred meters of atmospheric ducts in the near-surface layer, but the airborne sounding data do not show any atmospheric ducts. This may be due to the fact that the vertical resolution of the airborne sounding data used in this paper is only a few hundred meters, and the atmospheric ducts may occur in the near-surface layer within a few hundred meters, and the future should be able to use the data from the near-surface airborne sounding data with high resolution to calculate the atmospheric ducts, which can be used to correct the ERA5 atmospheric ducts, and in the future, the revised ERA5 data can be utilized together with the data from Taiwan's airborne soundings to build up an atmospheric ducting database for the Taiwan area and the surrounding seas.

**Keywords:** atmospheric ducting, ERA5