

旅顺近地面大气折射率变化特征分析

刘 成, 蒋 敏

中国人民解放军91913部队, 辽宁 大连

收稿日期: 2023年7月14日; 录用日期: 2023年8月15日; 发布日期: 2023年8月25日

摘 要

使用2019年至2023年旅顺微波辐射计数据, 研究了旅顺地区近地面折射率的季节和日变化。结果表明: 旅顺近地面大气折射率的季节性变化是随气候条件改变而引起的, 夏季的近地面折射通常比冬季具有更高的值; 折射率日变化基本上是温湿压的函数, 冬季折射率及其日变化是由折射率干项支配, 夏季折射率干项对折射率日分布贡献较大, 但湿项是夏季旅顺近地面折射率日变化的主要驱动因素。

关键词

折射率, 折射率干湿项, 变化特征

Analysis of Atmospheric Refraction Variation near the Ground in Lyushun

Cheng Liu, Min Jiang

91913 Unit of PLA, Dalian Liaoning

Received: Jul. 14th, 2023; accepted: Aug. 15th, 2023; published: Aug. 25th, 2023

Abstract

The seasonal and diurnal variations of near-surface refractive index in Lyushun region from 2019 to 2023 were studied using microwave radiometer data from Lyushun. The results show that the seasonal variation is caused by climatic conditions, and the surface refraction in summer is usually higher than that in winter. The diurnal variation of refractive index is basically a function of temperature, humidity and pressure. The diurnal variation of refractive index and its diurnal variation are dominated by the dry index term in winter, and the dry index term contributes more to it in summer.

Keywords

Refractive Index, Refractive Index Wet and Dry Terms, Change Characteristics

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

电磁波在大气中的传播效能对雷达、无线电、移动通信等众多系统的性能有重要影响。大气参数通过吸收、散射和折射影响高频无线电波和微波的传播。通过吸收、散射和折射过程, 电磁波在传播时会失去能量。其中, 折射率是理解无线电波在对流层中传播的重要参数。折射率的变化影响 30 MHz 以上频率的无线电波, 波传播中的各种现象, 如波导, 闪烁, 折射, 电磁波的衰落与之有关。比如, 由于空气折射率的不均匀空间分布而导致电磁波的路径弯曲会引起不利影响, 导致雷达采集中的距离和仰角误差 [1] [2], 同时会引起通信系统中多径衰落和跨视距传播 [3]。

近地面的大气温度、大气压力和相对湿度等气象要素受下垫面影响, 时间和空间分布呈现不均匀状态。对于中纬度沿海地区来讲, 近地面大气温度、气压和湿度较内陆地区存在很大的不同, 空气湿度较大, 气温日变化相对较小, 大气要素的季节性变化明显, 这些大气要素的变化导致该层面大气折射率因地而异 [4]。

本文利用微波辐射计反演的近地面大气折射率数据和同步大气温湿压等环境参数, 分析了辽宁旅顺近地面大气折射率的季节及日变化, 研究了大气环境要素对近地面大气折射率的影响。本研究可为旅顺地区的探测雷达效能分析、通信系统传输效果检验等与近地面大气折射率相关应用提供背景知识, 还可为其它地区大气折射率研究提供思路。

2. 研究区域及数据

(1) 研究区域

研究区域聚焦在辽宁旅顺。旅顺位于辽东半岛最南端, 三面环海, 东临黄海、西濒渤海, 南临渤海海峡, 南北长约 26 km, 东西长约 31 千米。旅顺气候属于温带大陆性季风气候, 兼具海洋性气候特征; 旅顺四季分明, 冬夏长、春秋短, 空气湿润温和。旅顺年平均降水量为 568 mm, 年降水集中在夏季(6~8 月份), 冬季(12 月份至来年 2 月份)降水稀少。

(2) 数据处理

本研究采用的环境采集设备为部署在旅顺的 QFW-6000 微波辐射计, 使用 QFW-6000 微波辐射计环境测量单元获取的温度、湿度和气压数据 [5] [6], 反演地面无线电折射率 N 。根据国际电信联盟定义 [7], 无线电折射率 N 由公式(1)~(5)计算获得, 该公式适用于 100 GHz 以下频率的电磁波, 误差小于 0.5%。公式(1)给出了无线电折射率的定义, 无线电折射率 N 由两部分构成, 分别为干项 N_{dry} 和湿项 N_{wet} , 具体见公式(2)和公式(3)。

$$N = N_{dry} + N_{wet} = \frac{77.6}{T} \left[P + 4810 \frac{e}{T} \right] \quad (1)$$

$$N_{dry} = 77.6 \frac{P}{T} \quad (2)$$

$$N_{wet} = 3.732 \times 10^5 \frac{e}{T^2} \quad (3)$$

其中, P 为大气压(hPa), e 为水汽压(hPa), T 为绝对温度(K)。

上述公式中大气水汽压 e 与相对湿度 RH 有如下关系:

$$e = \frac{RH * e_s}{100} \quad (4)$$

$$e_s = a * \exp\left(\frac{b * t}{t + c}\right) \quad (5)$$

其中, RH 为相对湿度(%), e_s 为饱和水汽压(hPa), t 为气温($^{\circ}\text{C}$), a 、 b 、 c 为常数项。水面上, $-40^{\circ}\text{C} \sim +50^{\circ}\text{C}$ 范围内, $a = 6.1121$, $b = 18.678$, $c = 257.14$ 。

温度、湿度和气压数据采样率为每分钟 6 次, 对微波辐射计获取的 2019 年 1 月份至 2023 年 5 月份的环境数据进行质量控制, 剔除异常值, 将有效的环境测量数据和反演的折射率进行算术平均, 求得逐小时、月份及季节平均值, 为接下来的研究提供基础数据支撑。

3. 结果及讨论

图 1 给出了旅顺近地面月均折射率的年变化, 从 1 月份至 12 月份, 折射率呈现先增大后减小的趋势。1 月份至 4 月份以及 12 月份月均折射率较低, 月平均折射率的最小值约为 $308 N$, 出现在 1 月份; 6 月份至 9 月份月均折射率较高, 最大值约为 $378 N$, 出现在 8 月份, 一年中旅顺近地面月均折射率差值达到 $70 N$ 。

分析月均折射率湿项(图 2)和干项(图 3)对月均折射率的贡献, 月均折射率干项量值介于 260 至 $290 N$, 月均折射率湿项量值介于 20 至 $120 N$, 可见, 月均折射率干项在月均折射率中占比较大, 但从年变化来看, 月均折射率变化模式与月均折射率湿项变化模式一致, 这种变化模式表明湿项在折射率月变化中起到支配作用, 上述现象可能与近地面层湿度月变化有关(图 4), 1 月份至 4 月份、12 月份旅顺主要受大陆冷高压控制, 空气寒冷干燥, 相对湿度较小, 6 月份至 9 月份相旅顺受西太平洋副热带高压外围影响, 空气湿度较大。从折射率季节平均值变化看, 冬季(12 月份、1 月份和 2 月份)月均折射率较小, 夏季(6~8 月份)月均折射率较大。

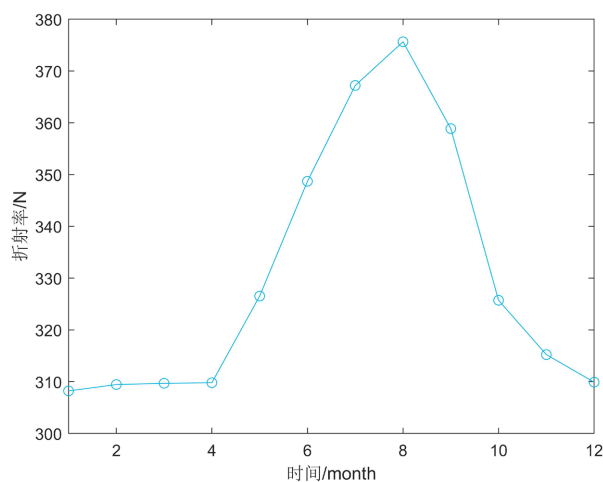


Figure 1. Monthly average refractive index

图 1. 月均折射率

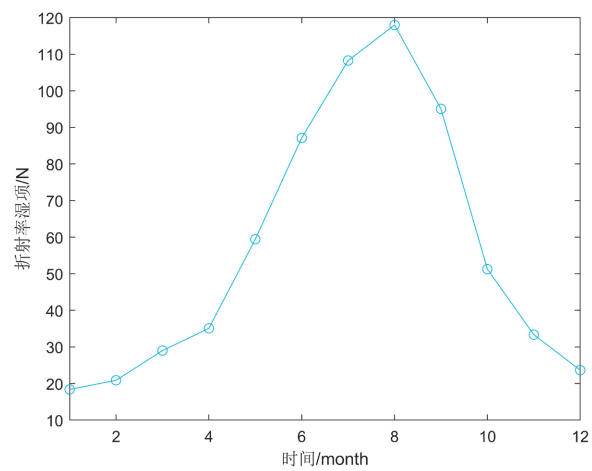


Figure 2. Monthly average refractive index wet term

图 2. 月均折射率湿项

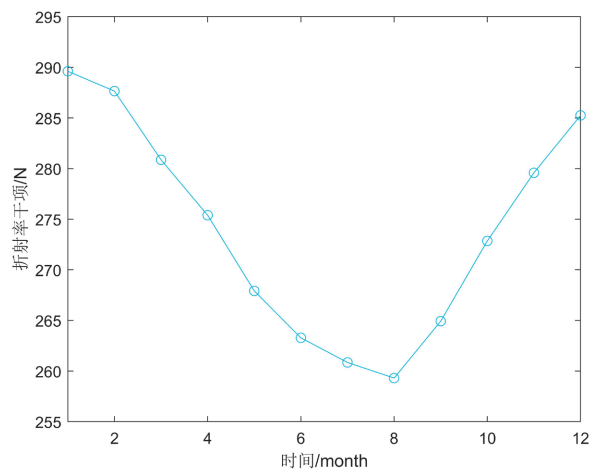


Figure 3. Monthly average refractive index dry term

图 3. 月均折射率干项

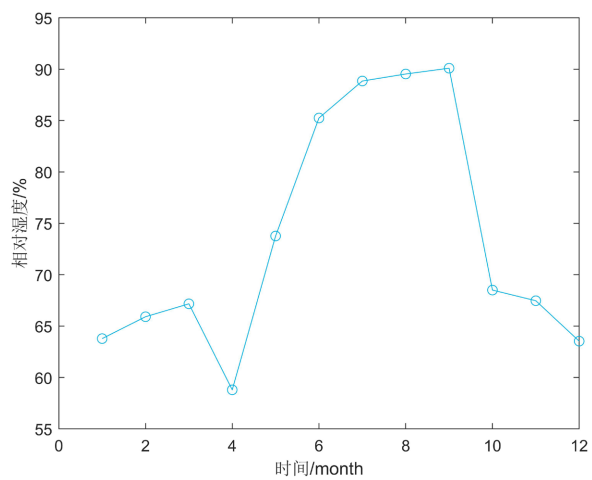


Figure 4. Monthly average relative humidity

图 4. 月均相对湿度

进一步分析冬季和夏季折射率的日变化。图 5 至图 7 展示了冬季(12 月、1 月和 2 月)折射率以及其干湿项的日变化。图 5 折射率的日变化显示从当天北京时间 00:00 开始折射率逐渐增加, 在北京时间 07:00 左右达到约 $310.6 N$ 的当日峰值, 然后迅速降低, 在北京时间 14:00 左右减小到一天中的最小值, 约 $306.6 N$, 其后逐渐增加直至当日结束。这种变化模式与图 7 所示的折射率干项日变化曲线同步, 与图 6 所示的折射率湿项日变化曲线匹配度不高; 折射率干项的此种日分布可能与气温的日变化有关, 冬季日出之后, 测站周围气温迅速升高, 且在每日的 14:00 左右达到日气温最大值, 冬季日气温的上述变化导致了折射率干项在夜间较大, 而在中午前后较小; 另外, 折射率干项数值介于 $284.6 N$ 至 $289.2 N$ 之间, 折射率湿项数值介于 $20.2 N$ 至 $21.5 N$ 之间, 湿项数值不足干项的 10%, 因此, 折射率干项在冬季折射率日分布中占比较大, 这表明旅顺冬季折射率及其日变化是由折射率干项支配。

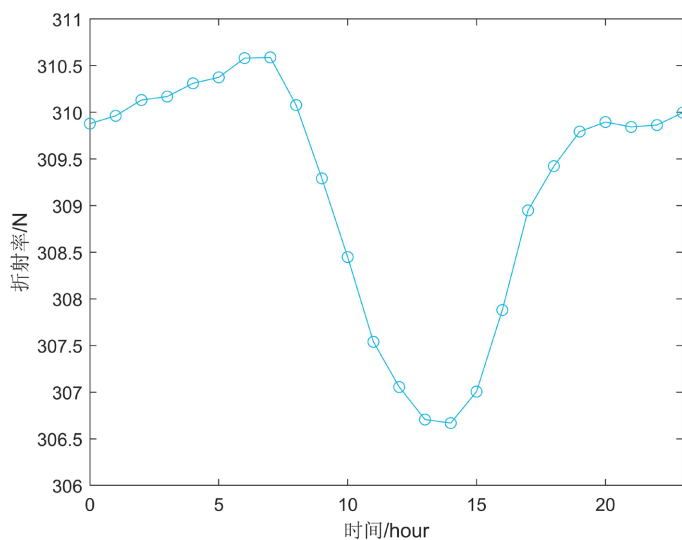


Figure 5. Diurnal variation of refractive index in winter

图 5. 冬季折射率日变化

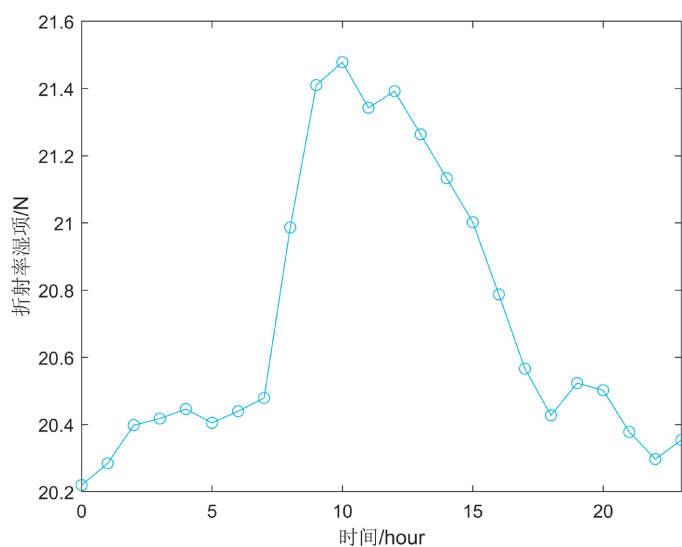


Figure 6. Diurnal variation of refractive index wet term in winter

图 6. 冬季折射率湿项日变化

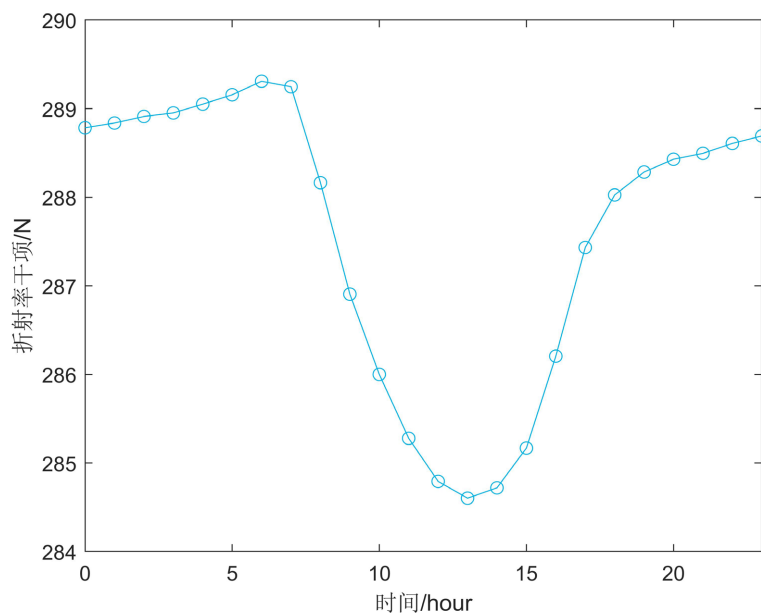


Figure 7. Diurnal variation of refractive index dry term in winter
图 7. 冬季折射率干项变化

夏季折射率日变化, 及其同步的气温、相对湿度和气压日变化由图 8 至图 10 给出。夏季折射率与冬季折射率日变化呈现近乎完全相反的模式, 夏季折射率最小值出现在夜间至凌晨, 其中 04:00 折射率最小, 为 358.8 N , 最大值出现在北京时间 14:00, 折射率为 362.6 N , 此时刻正是冬季日折射率最小的时刻。从折射率的干湿项量值来看, 折射率干项数值介于 259.4 N 至 263.3 N 之间, 折射率湿项数值介于 96 N 至 104.5 N 之间, 干项明显大于湿项, 说明折射率干项在夏季折射率日分布中贡献较大。从折射率日变化来看, 夏季折射率日变化模式与折射率湿项日变化趋势一致, 表明夏季折射率日变化由其湿项驱动。

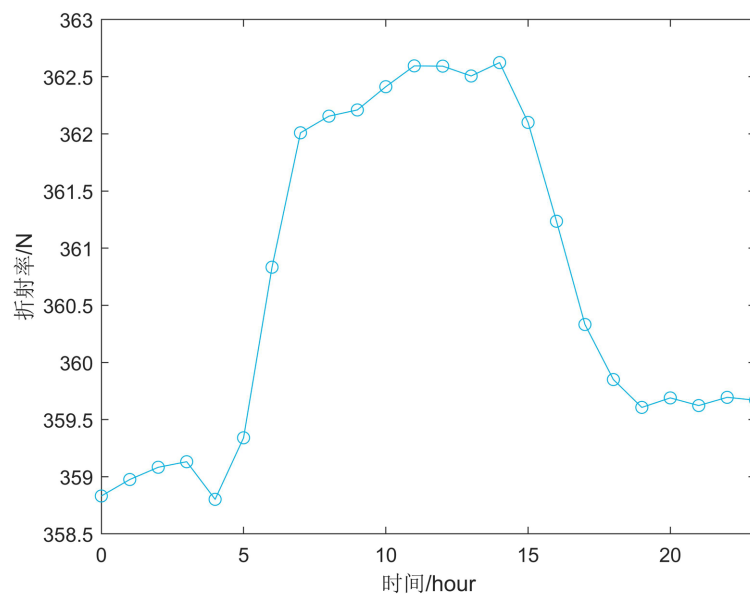


Figure 8. Diurnal variation of refractive index in summer
图 8. 夏季季折射率日变化

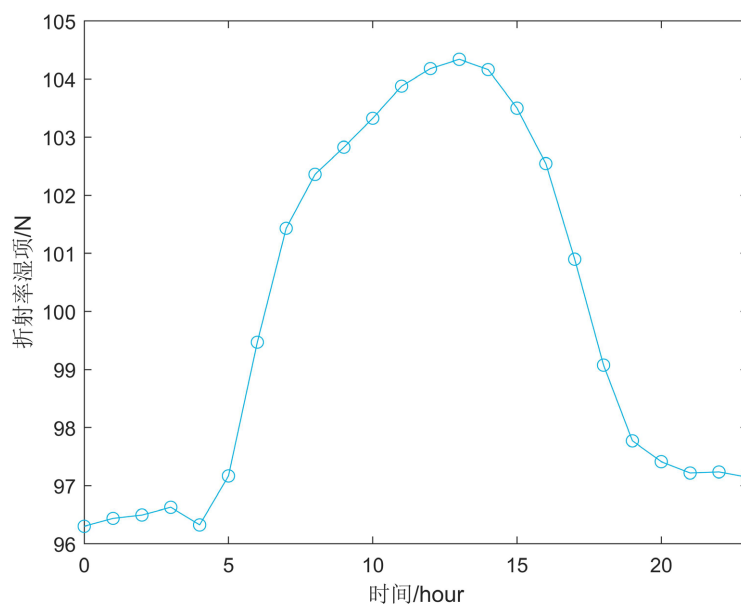


Figure 9. Diurnal variation of refractive index wet term in summer

图 9. 夏季折射率湿项日变化

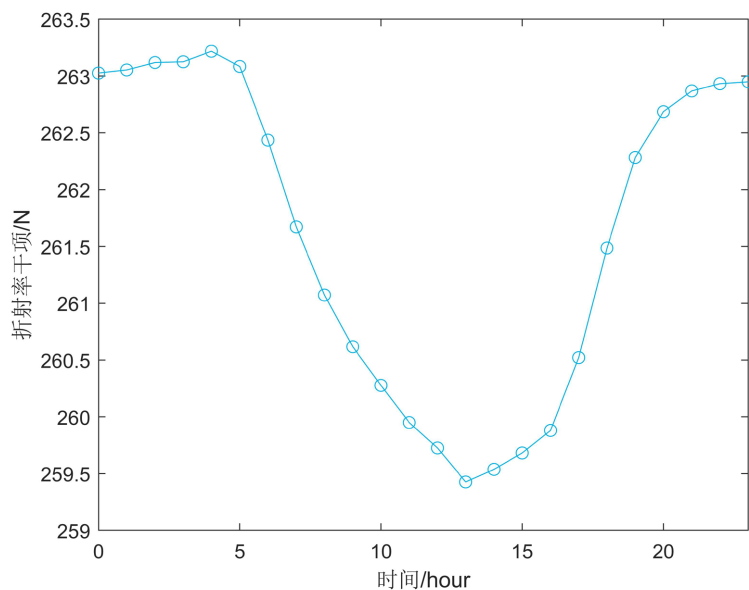


Figure 10. Diurnal variation of refractive index dry term in summer

图 10. 夏季折射率干项日变化

4. 小结

根据旅顺近 4 年气象实况资料分析, 旅顺近地面折射率存在如下变化特征:

(1) 折射率存在明显的月波动, 一年中月均折射率呈现单峰值, 最大值出现在 8 月份, 月均折射率年较差达到 $70 N$ 。

(2) 折射率日变化与季节有关, 冬季和夏季折射率日变化呈现近乎相反的模式, 冬季和夏季折射率日变化的驱动因素也不同, 冬季折射率日变化由其干项驱动, 而夏季折射率日变化由其湿项支配。

参考文献

- [1] Grabner, M. and Kvicera, V. (2003) Refractive Index Measurement at TV Tower Prague. *Radio Engineering*, **12**, 5-7.
- [2] Bean, B.R. and Thayer, G.D. (1963) Comparison of Observed Atmospheric Radio Refraction Effects with Values Predicted through the Use of Surface Weather Observations. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, **67**, 273-285. <https://doi.org/10.6028/jres.067D.031>
- [3] 孙长龙. 对流层散射通信链路损耗研究[J]. 舰船科学技术, 2021, 43(6): 138-140.
- [4] 成印河, 周生启, 王东晓. 海上大气波导研究进展[J]. 地球科学进展, 2013, 28(3): 318-326.
- [5] 刘萱, 岳增祥, 陈后财, 等. QFW-6000 型微波辐射计探测精度分析[J]. 电子技术与软件工程, 2020(9): 66-68.
- [6] 王宁, 郭立新, 赵振维, 等. 中国东南沿海地区大气反常结构遥感初探[J]. 遥感学报, 2017, 21(6): 948-954.
- [7] Recommendation ITU-R No. P.453-14: The Refractive Index: Its Formula and Refractivity Data. 2019. <http://www.itu.int/publ/R-REC/en>