

# 哥德堡地区基于无线通讯网络的水汽密度监测分析

苏桂炆<sup>1,2</sup>, 韩琰琰<sup>1,2\*</sup>, 毕永恒<sup>2</sup>, 刘 昆<sup>1</sup>, Lei BAO<sup>3</sup>

(1. 成都信息工程大学电子工程学院, 四川 成都 610225;

2. 中国科学院大气物理研究所中层大气与全球环境探测实验室, 北京 100029;

3. Ericsson AB, Lindholmospiren 11, 412 56 Göteborg, Sweden)

**摘要:** 利用无线通讯网络中的微波链路来监测降雨和水汽等是大气环境监测的新技术之一。这个技术可以测量近地面的降雨强度和水汽密度等气象参数, 具有时空分辨率高、成本低等优势。利用瑞典爱立信公司(Ericsson)提供的位于哥德堡地区 E 频段的微波通讯链路资料、位于链路一端的气象站 1 资料和由瑞典气象水文研究所(SMHI)气象网站提供的气象站 2 资料, 对 2017 年 06 月 13 日至 2017 年 07 月 13 日近 1 个月的水汽密度进行反演计算和分析。结果表明: 同一区域的不同地点处的气象要素有一定的差异性, 同一区域的温度会有一定的浮动(0~4°C), 两者之间的相关性为 0.87; 微波通讯链路反演的水汽密度结果与研究区域的地面气象站 1 和气象站 2 测量结果有很好的—致性, 两者之间的相关性分别为 0.89 和 0.97, 均方根误分别差为 0.75 g/m<sup>3</sup> 和 0.79 g/m<sup>3</sup>; 利用微波链路, 与现有的湿度监测方法相比, 可以为现有的天气监测网络提供额外的丰富的数据源。

**关键词:** 微波通讯链路; 水汽密度反演和监测技术; 哥德堡地区; E 频段

中图分类号: P407.7 文献标识码: A

## Monitoring and analysis of water vapor density based on wireless communication network in Gothenburg area

SU Gui-Yang<sup>1,2</sup>, HAN Cong-Zheng<sup>1,2\*</sup>, BI Yong-Heng<sup>2</sup>, LIU Kun<sup>1</sup>, Lei BAO<sup>3</sup>

(1. School of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Engineering, Chengdu 610225, China;

2. Laboratory of Middle Atmosphere and Global Environment Exploration, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

3. Ericsson AB, Lindholmospiren 11, 412 56 Göteborg, Sweden)

**Abstract:** The use of microwave links in wireless networks to monitor rainfall and water vapor is the latest technology in atmospheric environmental monitoring. This technology can measure meteorological elements such as rainfall and water vapor near the surface and has the advantages of high spatial and temporal resolution and low cost. The water vapor density from June 13, 2017 to July 13, 2017 is calculated and analyzed by using the data of the microwave communication link in the E-band of Gothenburg provided by Ericsson, the data of meteorological station 1 provided by the meteorological station at one end of the link and the data of meteorological station 2 provided by the meteorological website of the Swedish Institute of Meteorology and Hydrology (SMHI). The results show that the environmental conditions at different locations in the same area have certain differences, the temperature of the same area shows a variation (0~4°C), the correlation between the two is 0.87; We retrieved water vapour density value from the microwave communication link and compared with the measurement from ground weather station in the study area, and we found the results have good consistency. The correlation between the two is 0.89, and the root mean square error is 0.75 g/m<sup>3</sup>. We have demon-

收稿日期: 2019-01-10, 修回日期: 2019-09-19

Received date: 2019-01-10, Revised date: 2019-09-19

基金项目: 中国国家自然科学基金(41605122); 中国科学院人才计划“国际访问学者”(2018VTA0013)

Foundation items: Supported by the National Natural Science Foundation of China (41605122); Chinese Academy of Sciences President's International Fellowship Initiative (PIFI) for Visiting Scientists (2018VTA0013)

作者简介(Biography): 苏桂炆(1992-), 男, 江苏泰州人, 硕士研究生, 主要研究方向气象探测技术及应用。

\*通讯作者(Corresponding author): E-mail: c.han@mail.iap.ac.cn

strated that microwave links can be utilized to provide an extra rich data source for existing weather monitoring networks in addition to existing humidity monitoring methods.

**Key words:** microwave links, water vapour monitoring technique, Gothenburg area, E-band

**PACS:**92. 60. Ta, 42. 68. Ay

## 引言

水汽的扩散与输送,是地球上水循环过程的重要环节,是将海水、陆地水与空中水联系在一起的纽带。水汽蒸发和冷凝循环通过将热量从地表传递到大气,反之亦然,对地球的能量存储起着重要作用<sup>[1]</sup>。无线通信已成为我们生活中非常重要的一部分,无线通信是基于用电磁波来传输的一种方式,它包含了通过无线通信技术和设备使用电磁波信号在两个或多个设备之间进行连接和通信的所有过程和形式<sup>[2]</sup>。利用微波信号进行信号传输是无线通信方式中的一种,微波信号是指波长介于红外线 and 无线电波之间的电磁波,微波信号的频率范围大约在 300 MHz 至 300 GHz 之间,所对应的波长为 1 m 至 1 mm 之间,是分米波、厘米波、毫米波的统称<sup>[3]</sup>。而大气要素是影响微波信号通信质量的关键因素之一。当微波信号在大气环境中传播时,受到大气介质的影响会产生吸收、散色、极化、衰减等现象<sup>[4]</sup>。在通信领域,会尽可能的减小或避免大气介质对微波信号传输的影响,但在气象领域,近年来提出了一种利用微波信号的衰减来进行一些气象要素的监测的新技术,作为传统气象观测的补充<sup>[5-7]</sup>。在欧洲的许多国家,微波链路测量降水的技术已被证明可以作为雨量计和雷达网络测量降水方法的有效补充。荷兰<sup>[8-10]</sup>、德国<sup>[11]</sup>、瑞典<sup>[12]</sup>、西非<sup>[13-14]</sup>的学者正在当地开在相关实验。

以色列研究团队通过前期的研究,提出微波链路也可以用于监测近地面的水汽密度。通过以色列北部和中部的微波链路实验数据,研究发现微波链路反演结果与地面站湿度测量的相关性分别为 0.9 和 0.82<sup>[15]</sup>。Alpert 等人根据以色列的商业微波链路数据生成空气湿度图,并首次与欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的 2017 年 4 月的 ERA-Interim 湿度图进行比较结果显示基于链路数据生成的湿度图更精确<sup>[16]</sup>。当前的水汽测量主要是通过地面气象站、无线电探空仪或卫星遥感数据。地面观测站通常提供点观测,因此空间代表性低。此外,在异常的地形中或通常在具有复杂地形的区域中建立气象站的测量难度大,且造价较高。现有的无线

电探空仪测量有约 10%~15% 的误差<sup>[17]</sup>,而且通常情况下,每天只能发射 2~4 次的无线电探空仪,因此也只能提供非常有限的信息。即使如此,也由于释放条件的限制而无法全球推广<sup>[17]</sup>。卫星确实允许覆盖大范围区域,但在用于监测地表水汽上往往不够精确。利用微波链路测量水汽密度的优势在于,微波链路中的信号传输是固定的视距传播,靠近地面;可以充分利用广泛、密集分布的无线通信设施及微波链路,获得高时空分辨率的降水分布;通讯网路每天 24 小时运行,获取测量数据无需监督和额外的费用;商业微波通信网络遍布世界各地,可视为随处可见的无线气象传感网络。

毫米波是指频段范围为 30~300 GHz 的电磁波,所对应的波长为 1~10 mm 之间。因为频段位于微波和远红外波相交叠的波长范围,所以会兼有两种波普的相关特性<sup>[18]</sup>。由于雨滴、冰雹和雪花的物理尺寸和传播的无线电的波长相当,特别在高频段,天气状况对毫米波的衰减有很大的影响<sup>[19]</sup>。第五代通讯技术将广泛使用毫米波频段,我们相信随着 5G 时代的到来,将会有更多的毫米波链路,包括 E 频段链路(71~76 GHz, 81~86GHz)。近年来,在瑞典(默恩达尔),匈牙利(布达佩斯),英国(贝辛斯托克),意大利(都灵)和印度(孟买)开展了第五代移动通讯将使用的 E 频段受天气影响的相关研究实验<sup>[20-21]</sup>。基于瑞典爱立信公司在哥德堡地区架设的商用 E 频段毫米波链路实验,本文将研究利用 E 频段毫米波链路信号来反演水汽密度的准确性和应用前景。

## 1 资料和方法

### 1.1 资料

本文采用的是瑞典爱立信公司(Ericsson)提供的位于哥德堡地区(57°40'18"N, 11°58'51"E) 2017 年 06 月 13 日至 2017 年 07 月 13 日为期一个月的商用微波通讯链路的资料。该资料为文本格式,以 32 秒的采样率记录着通讯微波链路的信息数据。每个记录包含有信号发射端的地址、日期、调制方式、接收功率、发射功率等具体信息。图 1 展现了研究区域和设备的架设地点。链路的两端分别架设有 E

频段的天线用于微波信号的发射和接收,其中一端架设在哥德堡地区的 Lindholmen (57° 42' 18.97" N, 11° 56' 29.67" E), 另外一端架设在哥德堡地区的 Älvsborgsbron (57° 41' 20.04" N, 11° 54' 10.76" E)。E 频段的微波链路是一个双向链路即可以从 A 端到 B 端, 反之亦然。链路的工作频率分别是 82.625 GHz 和 72.625 GHz, 其中两端天线的增益恒定均为 50.5 dBi, 链路之间的视距传播距离约为 3 km, 本文选用的是工作在 82.625 GHz 垂直极化条件下的链路资料。气象要素的分析使用瑞典爱立信公司提供的位于研究区域的气象站数据, 该资料每 10 秒记录一次, 记录此刻的室外温度、湿度、压强、降雨速率等气象数据。该气象站和链路 B 端都位于爱立信公司的楼顶, 本文中将其命名为气象站 1。另外, 本文还分析了瑞典气象水文研究所 (SMHI) 气象网站提供的位于哥德堡地区气象站站点 (57° 37' 56.64" N, 11° 36' 27.72" E) 的观测数据, 该站点的气象站被命名为气象站 2, 站点的具体位置分布情况见图 1。

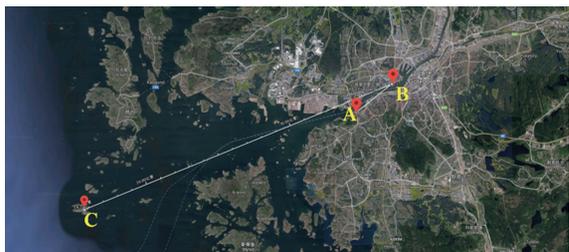


图 1 在哥德堡地区的研究区域和设备架设。图中的 A、B 两点是微波链路天线的架设位置, 白色的直线是链路的传播距离为 3 km。图中的 C 点是瑞典气象水文研究所 (SMHI) 气象网站提供的位于哥德堡地区气象站站点的位置, 该气象站和链路 B 端的距离为 21 km

Fig. 1 Research areas and equipment locations in the Gothenburg area. The two points A and B in the figure are the locations of the microwave link antenna, and the white straight line is the link propagation distance of 3 km. Point C in the figure is the location of the Gothenburg area weather station site provided by the Swedish Meteorological and Hydrological Research Institute (SMHI) meteorological website, which is 21 km away from the B-end of the link

该研究中, 采用的链路频率属于 E 频段。E 频段是指频率在 71~76 GHz 和 81~86 GHz 的毫米波段。它是目前商用微波通信中使用的最高频段, 也是未来 5G 通信会采用的频段。E 频段频谱资源丰富, 可以缓解传统频谱资源日趋紧张; E 频段波束更

窄, 这有助于减少站点之间的干扰; E 频段可用总频宽高达 10 GHz。根据欧洲电信标准化协会 (ETSI) 的标准, 可分为 19 对 250 MHz 的子频带。可以组合使用多个子带, 使得 E 频段毫米波通信系统能够传输 G 比特以上容量的业务。E 频段频率下的无线传播是众所周知的。这些特性与广泛使用的低频微波波段的特性略有不同, 能够实现几公里的传输距离。图 2 显示了在气压 1 013 hPa、温度 15 °C、水汽密度 7.5 g/m<sup>3</sup>, 0~300 GHz 频带的无线电波在大气中的特征衰减。

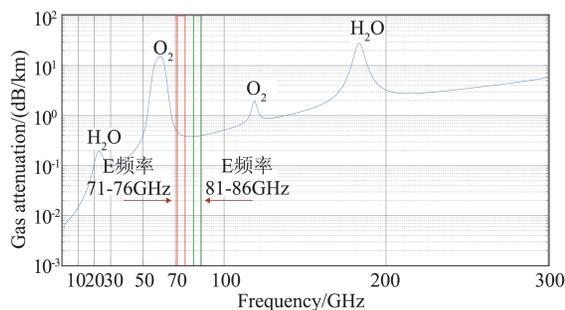


图 2 不同频段电磁波信号在大气中的衰减特征

Fig. 2 Attenuation characteristics of electromagnetic wave signals in different frequency bands in the atmosphere

大气中无线电波的衰减随频率变化很大, 它的衰减特性如图 2 所示。在传统微波频段范围内, 海平面大气造成的衰减至多为 0.2 dB/km。在 23 GHz 和 60 GHz 频段附近产生了两处衰减高峰, 分别是由于水汽吸收和氧气吸收引起。这种吸收效应在 60 GHz 处非常的明显, 导致吸收衰减达到 15 dB/km 左右, 显著的限制了毫米波信号在大气中的长距离传输。在 70~100 GHz 之间这个频段范围内, 大气的吸收衰减最高为 0.5 dB/km, 很接近传统频带范围引发的大气衰减。因此, E 频段的毫米波信号可以以较高的传输速率在几公里的范围内进行有效传输。

## 2.2 理论和方法

### 2.2.1 通过无线通信网络估算湿度

在无线通信系统中, 信号在发射机和接收机之间传播发生的损耗称为传播路径损耗。由于存在阻挡视线路径的障碍物, 导致电磁波通常不能直接到达接收端。基于理论和测试研究表明, 平均接收信号功率随距离的对数衰减, 常用对数距离路径损耗模型表示, 其损耗模型为<sup>[22]</sup>:

$$PL(f, d)[\text{dB}] = FSPL(f, 1m)[\text{dB}] + 10n \log_{10}(d) + AT[\text{dB}] + \chi_{\sigma}^{Cl}, d \geq 1m, \quad (1)$$

$$FSPL(f, 1m)[dB] = 20 \log_{10} \left( \frac{4\pi f \times 10^9}{c} \right) \\ = 32.4 [dB] + 20 \log_{10}(f) \quad , \quad (2)$$

$FSPL(f, 1m)$  表示在载波频率  $f$  下, 传播距离为 1 m 时的自由空间路径损耗; 其中  $c$  是光速 (把光速的数值和单位写出来),  $f$  是频率单位 GHz;  $d$  为发射节点到接收节点之间的距离, 单位为 m;  $n$  是传输路径损耗指数, 与频率、天线高度及周围的传播环境有关, 在自由空间中  $n = 2$ , 当存在遮挡物的时,  $n$  的值变大, 表 1 给出了不同环境的路径损耗指数;  $AT$  是大气引起的衰减项, 单位 dB;  $\chi_{\sigma}^{CI}$  是均值为零标准差为  $\sigma$  的高斯分布随机变量。

表 1 不同环境的路径损耗指数<sup>[23]</sup>

Table 1 Path loss exponent for different environments

环境类型	路径损耗指数(n)
自由空间	2
城市地区蜂窝无线电	2.7 to 3.5
密集城区微蜂窝	3 to 5
建筑物上的视距传播	1.6 to 1.8
建筑物遮挡	4 to 6
工厂环境	2 to 3

电磁波在大气中传播时, 由于大气成分的作用而减弱。由于电磁波损耗是距离的函数, 一个特定频率毫米波链路由于大气效应作用的实际信号损耗直接取决于链路的长度。在频率范围为 1 GHz 到 100 GHz 的之间, 一种描述毫米波通过大气的衰减简化模型可以描述为以下形式<sup>[24]</sup>:

$$AT [dB/km] = AT_r [dB/km] + AT_v [dB/km] + \\ AT_o [dB/km] + AT_p [dB/km] \quad , \quad (3)$$

其中:  $AT_r$  为降雨造成的衰减;  $AT_v$  为水汽造成的衰减;  $AT_o$  为干空气造成的衰减;  $AT_p$  为其他因素造成的衰减 (如雾、降雪、冰雹等)。

在几十 GHz 的频率下, 低层大气中的主要吸收气体是氧气和水汽。氧气的吸收带带宽约 60 GHz, 水汽具有谐振线在 22.235 GHz。虽然其他大气分子在这个频率区域有谱线, 但它们的强度太小, 不足以显著影响传播<sup>[25]</sup>。因此, 与水分子相互作用的人射微波信号会衰减, 特别是微波的频率接近水分子的共振频率。在毫米波长下, 由干燥空气和水汽引起的具体衰减  $\gamma$  已被充分研究, 并且可用以下步骤对其进行评估<sup>[26]</sup>:

$$Y = AT_v + AT_o = 0.1820fN'' [dB/km] \quad , \quad (4)$$

式(4)中:

如果空气是潮湿的, 在 ~22 GHz 的频率下, 干燥空气造成的衰减  $AT_o$  比水汽造成的衰减  $AT_v$  要小可以忽略不计衰减主要由水汽引起;

$f$  为毫米波信号的频率 [GHz];

$N'' = N''(p, T, \rho, f)$  为该频率相关的复合折射率的假设部分, 是有关压强  $p$  [hPa], 温度  $T$  [°C], 频率  $f$  [GHz] 和水汽密度  $\rho$  [g/m<sup>3</sup>] 的函数。

其中:

$$N''(f) = \sum_i S_i F_i + N''_D(f) \quad , \quad (5)$$

式中:  $S_i$  为第  $i$  线的强度;  $F_i$  为曲线形状因子以及总和扩展至所有线;  $N''_D(f)$  为大气压力造成的氮气吸收和 Debye 频谱的干燥连续带。

基于上面的理论, 精确反演水汽密度需从链路资料中提取水汽引起的衰减。考虑到引起信号衰减因素复杂, 不好从众多因素中精确提取衰减量带来的反演误差。选用参考值结合信号衰减量的变化来达到较好的反演效果。传输路径的单位损耗  $AL$  [dB/km] 可由链路的发射功率和接收功率表示, 其具体表达式为:

$$AL = (P_t - P_r) / L \quad , \quad (6)$$

式中:  $P_t$  为微波链路发射端的信号强度;  $P_r$  为微波链路接收端的信号强度;  $L$  为微波链路的传输距离。

结合式(6)可以求出微波信号传输路径的单位损耗  $AL$ 。为了估算湿度变化引发的链路衰减, 一个衰减参考值  $AL_{ref}$  需要被确定, 对应的水汽密度记为  $\rho_{ref}$ 。一天中 (晴天), 假设信道的衰减因素特性不变, 由式(3)可知, 大气衰减的变化是和水汽密度变化有关, 即:

$$\Delta AL_{k,i} = AL_{k,i} - AL_{k,ref} \quad , \quad (7)$$

其中  $AL_{k,i}$  为第  $k$  天第  $i$  次测量的链路衰减,  $AL_{k,ref}$  为第  $k$  天的链路衰减参考值,  $\Delta AL_{k,i}$  为第  $k$  天第  $i$  次测量的链路衰减的变化量。结合式(4), 得到水汽密度的变化从而反演出水汽密度  $\rho$  [g/m<sup>3</sup>]。

因此, 只要在给定温度, 大气压强和毫米波频率的条件下就可以通过方程(4)求出此时的水汽密度  $\rho$  [g/m<sup>3</sup>]。图 3 给出了基于等式(4)在气压 1013 hPa、温度 15 °C、1 km 条件下典型链路湿度衰减和频率的关系图。表 2 给出了在压 1013 hPa、温度 15 °C、1 km 条件下根据 ITU 经验公式<sup>[26]</sup>计算的几

个典型 5G 频率的衰减值。

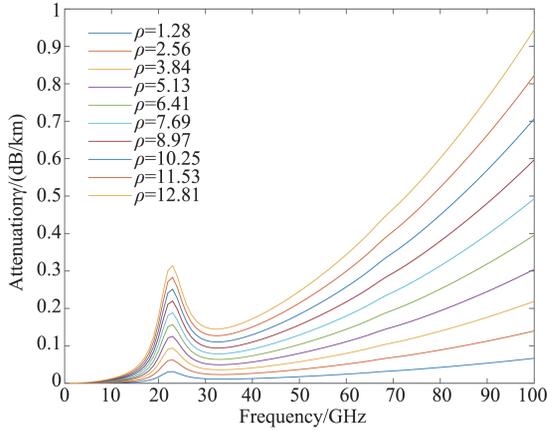


图3 在链路长度 1km 条件下由水汽引起的传输损耗。不同的颜色曲线代表不同的水汽密度

Fig. 3 Transmission loss due to water vapor at the link of 1km length. Different color curves represent typical humidity at different densities

### 2.2.2 通过气象站数据估算湿度

气象站通常不提供绝对湿度  $\rho$  [ $\text{g}/\text{m}^3$ ], 可通过提供的相对湿度  $RH$  [%] 转换<sup>[1][26][27]</sup>:

$$e_s = 6.112 \exp\left(\frac{17.67T}{T + 243.5}\right) \quad (8)$$

$$e = \rho \frac{T + 273.15}{216.7} \quad (9)$$

$$\frac{e}{e_s} 100\% = RH \quad (10)$$

式中:  $e_s$  为饱和水汽压, 单位为 [ $\text{hPa}$ ];  $e$  为水汽分压, 单位为 [ $\text{hPa}$ ];  $T$  为温度, 单位 [ $^{\circ}\text{C}$ ];  $\rho$  为水汽密度, 单位 [ $\text{g}/\text{m}^3$ ];  $RH$  为相对湿度, 单位 [%]。

导出:

$$\rho = 1324.45 + \frac{RH}{100\%} \times \frac{\exp(17.67T)}{T + 273.15} \quad (11)$$

### 2.2.3 统计分析

根据上述方法, 2017年06月13日至2017年07

月13日商用微波通讯链路的资料中有降雨天气条件的样本资料被剔除。共有21天的链路资料被反演, 将基于链路反演的水汽密度与气象站实测结果进行分析。本文所用的统计方法主要有相关系数 (CORR), 均方根偏差 (RMSD), 平均值 (MEAN), 标准差 (STD)。

均方根偏差 (用 RMSD 表示) 定义为:

$$RMSD \left[ \text{g}/\text{m}^3 \right] = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\rho_{mi} - \rho_{gi})^2}{N}} \quad (12)$$

式中:  $\rho_{mi}$  为第  $i$  次水汽密度估测值基于微波链路;  $\rho_{gi}$  为第  $i$  次水汽密度实测值基于气象站;  $N$  为链路资料的样本数。

将微波链路信号衰减反演的水汽密度  $X$  的时间序列数据与气象站的水汽密度测量值  $Y$  进行比较。通过计算变量的相关系数来估计它们的线性相关性。如果每个变量有  $N$  个标量观测值, 则皮尔逊相关系数 (用 CORR 表示) 计算如下:

$$CORR = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left( \frac{X_i - \mu_X}{\sigma_X} \right) \left( \frac{Y_i - \mu_Y}{\sigma_Y} \right) \quad (13)$$

式中:  $\mu_X$  为微波链路信号衰减反演的水汽密度  $X$  的均值;  $\sigma_X$  为微波链路信号衰减反演的水汽密度  $X$  的标准差;  $\mu_Y$  为气象站的水汽密度测量值  $Y$  的均值;  $\sigma_Y$  为气象站的水汽密度测量值  $Y$  的标准差。其中,  $|CORR| \leq 1$ 。高相关系数值显示了两个数据集之间更好的相似性。

## 3 结果分析

在分析微波链路监测水汽的可行性之前, 需首先对研究区的气象要素进行评估。图 4a 给出了 2017年06月13日至2017年07月13日期间, 在哥德堡地区不同地点处气象站获得的温度时变化比较结果。结果展示了同一区域的温度会有一些的浮动 ( $0^{\circ}\text{C} \sim 4^{\circ}\text{C}$ ), 两者之间的相关性为 0.87。图 4b 给出

表2 不同湿度条件下典型 5G 频率的 ITU 模型理论衰减值 (dB/km)

Table 2 Theoretical Attenuation Values of ITU Model for Typical 5G Frequency under Different Humidity Conditions (dB/km)

湿度 频率	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
25GHz	0.0217	0.0437	0.0661	0.0888	0.1118	0.1351	0.1587	0.1827	0.2069	0.2315
28GHz	0.0137	0.0280	0.0427	0.0579	0.0735	0.0897	0.1063	0.1235	0.1411	0.1592
38GHz	0.0119	0.0246	0.0381	0.0525	0.0676	0.0836	0.1004	0.1180	0.1365	0.1557
71GHz	0.0338	0.0704	0.1097	0.1518	0.1967	0.2443	0.2948	0.3480	0.4040	0.4627
81GHz	0.4343	0.0905	0.1411	0.1954	0.2533	0.3148	0.3799	0.4486	0.5209	0.5969

了2017年06月13日至2017年07月13日期间,在哥德堡地区不同地点处气象站获得的绝对湿度时变化比较结果。两者的结果展示了一个很好相关性,相关系数为0.93。表3给出了不同地点处气象站的日变化参数统计。

综合表3和上述气象要素的评估比较,可以看到在同一区域不同地点处的气象要素有较

小的差异性。为了减小由于区域气象要素差异性带来的链路反演误差,本文将采用气象站1和气象站2测得的气象资料,分别作为评估微波链路监测水汽密度的可行性依据。我们选取了从2017年06月13日至2017年07月13日这一个月每天凌晨05:00时的微波链路资料进行水汽密度反演分析,其中出现降雨的日子已被

表3 不同地点处气象站的日变化参数统计

Table 3 Statistics of daily variation of atmospheric parameters from two meteorological stations at different locations

测量日期	Weather Station 1						Weather Station 2					
	最高温度(°C)	最低温度(°C)	平均温度(°C)	水汽密度最大值(g/m <sup>3</sup> )	水汽密度最小值(g/m <sup>3</sup> )	水汽密度平均值(g/m <sup>3</sup> )	最高温度(°C)	最低温度(°C)	平均温度(°C)	水汽密度最大值(g/m <sup>3</sup> )	水汽密度最小值(g/m <sup>3</sup> )	水汽密度平均值(g/m <sup>3</sup> )
2017/06/13	20.30	16.40	13.30	10.13	9.26	7.74	20.77	17.31	13.90	10.95	10.43	9.59
2017/06/14	20.40	16.64	12.70	11.03	9.67	8.54	17.71	15.69	13.40	11.30	10.46	9.77
2017/06/15	20.60	17.37	13.80	11.24	10.60	9.12	20.67	17.75	14.64	12.35	11.69	10.95
2017/06/16	18.70	16.78	15.20	13.82	12.67	10.59	18.06	16.59	15.23	13.39	12.49	11.12
2017/06/17	21.80	18.43	15.80	13.23	11.21	8.07	19.67	17.54	15.70	13.22	11.87	9.36
2017/06/18	22.50	19.10	15.90	13.19	12.47	11.79	19.89	17.67	15.64	13.95	13.00	11.85
2017/06/19	21.60	18.59	15.10	13.60	11.98	10.85	20.08	17.39	14.80	14.07	12.70	11.77
2017/06/20	18.80	16.88	15.30	11.93	8.37	6.28	17.07	15.95	15.17	13.14	9.54	7.70
2017/06/21	19.40	16.22	13.40	8.84	7.35	5.17	17.28	15.52	13.72	9.61	8.34	6.48
2017/06/22	16.00	14.79	13.40	10.51	9.59	8.87	15.75	14.46	13.44	10.77	10.16	9.42
2017/06/23	20.70	16.32	13.50	12.83	11.34	10.29	20.02	15.92	13.45	12.53	11.59	10.17
2017/06/24	18.80	16.16	13.70	11.59	9.31	6.84	16.49	15.34	14.12	11.83	10.22	8.25
2017/06/25	16.40	13.81	11.50	9.81	8.94	8.31	14.47	13.38	11.64	9.74	9.38	9.06
2017/06/26	18.00	15.04	12.30	9.12	8.57	7.80	15.83	14.19	12.50	9.60	9.29	9.00
2017/06/27	20.20	16.68	13.50	9.16	6.68	5.24	19.06	15.85	13.21	9.75	7.60	6.15
2017/06/28	23.60	18.50	13.10	8.65	7.55	6.01	22.07	18.00	13.37	9.63	8.56	7.36
2017/06/29	21.20	18.33	15.60	9.26	7.79	6.50	20.71	17.95	15.40	10.21	8.81	7.59
2017/06/30	22.00	18.63	15.30	9.89	8.66	7.42	21.50	18.28	15.18	10.70	9.55	8.57
2017/07/01	24.30	19.77	15.10	10.65	8.78	6.78	22.91	19.00	15.85	11.18	9.81	7.91
2017/07/02	18.50	15.50	13.80	10.57	9.22	7.98	16.48	14.82	13.56	10.91	10.06	9.19
2017/07/03	18.30	15.19	13.00	9.64	8.50	7.55	16.29	14.41	12.63	10.24	9.28	8.47
2017/07/04	20.20	16.38	12.40	9.88	8.43	6.43	17.62	15.34	12.35	10.14	9.23	8.26
2017/07/05	19.80	16.32	11.20	11.57	9.94	8.51	17.80	15.53	12.14	11.90	10.66	9.59
2017/07/06	18.60	15.96	11.40	10.51	9.85	7.59	17.27	15.38	12.49	11.13	10.55	9.50
2017/07/07	21.60	17.48	14.80	11.56	10.18	8.44	18.82	16.60	14.76	11.86	11.17	10.42
2017/07/08	18.50	16.09	14.20	12.35	10.95	9.04	17.43	15.60	14.26	12.21	11.36	9.92
2017/07/09	18.70	16.28	14.00	10.70	9.42	8.19	17.32	15.42	13.88	11.29	10.17	9.09
2017/07/10	19.70	17.26	12.80	11.43	9.92	8.77	18.35	16.49	13.16	12.05	10.88	10.21
2017/07/11	21.50	17.73	13.90	12.50	11.16	9.18	18.90	17.08	14.17	13.12	11.84	10.69
2017/07/12	18.70	16.15	13.30	11.37	8.97	8.00	17.14	15.31	13.82	12.09	9.94	8.82
2017/07/13	19.70	16.11	10.60	10.13	7.90	5.84	17.63	15.41	11.63	10.35	8.76	7.59

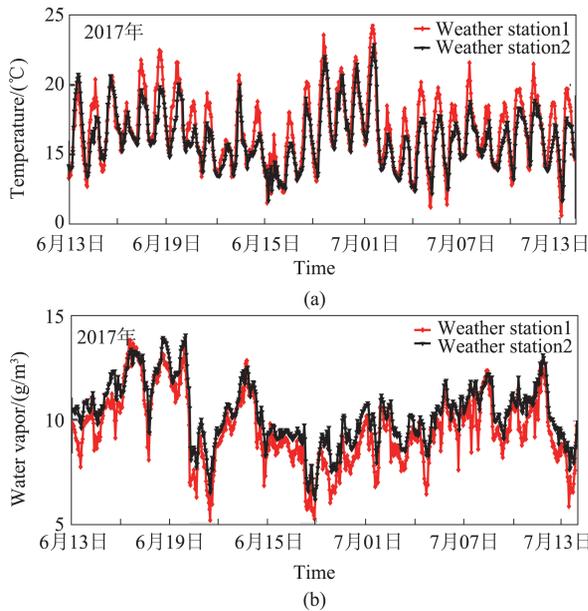


图4 气象要素评估(a)同一个区域两个气象站的温度测量值对比,(b)湿度测量值对比

Fig. 4 Environmental condition assessment (a) Comparison of temperature measurements from two weather stations in the same area, (b) Comparison of absolute humidity level measurements from two weather stations in the same area

排除在外。图5显示了在一个月使用从无线通信链路获得的数据计算的绝对湿度日间变化的结果,与气象站1和气象站2实测结果相比较。气象站测量结果和微波链路的测量结果展现了传统技术与新方法很好的相关性两者时间序列相关系数分别为0.89和0.97。表4给出了微波链路反演结果与气象站1水汽密度测量值的统计分析。表5给出了微波链路反演结果与气象站2水汽密度测量值的统计分析。综合表

表4 微波链路反演与气象站1测量的水汽密度的统计分析  
Table 4 Statistical Analysis of Water Vapor Density of Microwave Link and Weather Station 1

测量方式	平均值	标准差	均方根偏差	相关系数
气象站1	10.22	1.29	0.75	0.89
Microwave	10.46	1.62		

表5 微波链路反演与气象站2测量的水汽密度的统计分析  
Table 5 Statistical Analysis of Water Vapor Density of Microwave Link and Weather Station 2

测量方式	平均值	标准差	均方根偏差	相关系数
气象站2	11.22	1.83	0.79	0.97
Microwave	10.46	1.62		

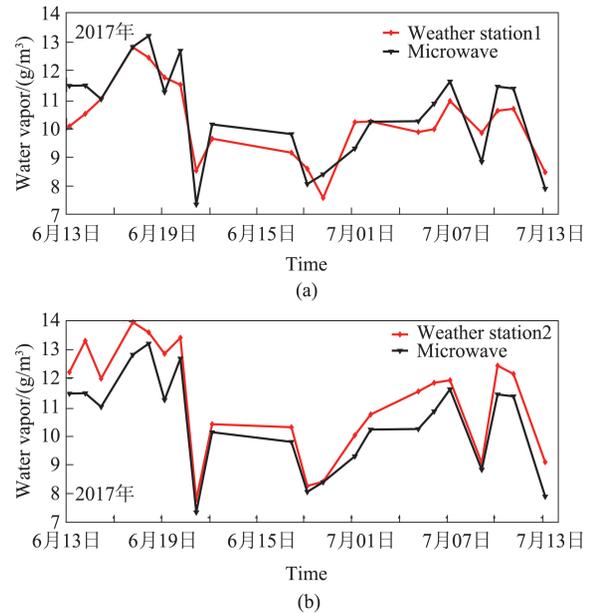


图5 一个月使用从微波通讯链路获得的数据计算的水汽密度数值与气象站测量值相比较的日间变化结果(a)气象站1的测量值与微波通讯链路获得的数据计算的水汽密度对比,(b)气象站2的测量值与微波通讯链路获得的数据计算的水汽密度对比

Fig. 5 Day-to-day variation results of water vapour density calculated using data obtained from a microwave communication link within one month compared to weather station measurements (a) Comparison of the measured values of the weather station 1 with the water vapor density calculated from the data obtained by the microwave communication link, (b) Comparison of the measured values of the weather station 2 with the water vapor density calculated from the data obtained by the microwave communication link

4和表5,微波链路反演的水汽密度和气象站1与气象站2的RMSD分别为0.75和0.79,结果表明微波链路的反演结果和气象站测量偏差较小,该方法可以用于水汽密度的监测。

#### 4 误差和不确定性分析

结果表明,基于微波通信链路数据的水汽反演和传统的气象站观测结果有较好的一致性。为了达到更高的反演精度,其中的误差需要进一步的研究。引起误差的原因是多方面的。一方面是,微波通讯链路的路径长度与实验的精确度和敏感度息息相关。如果微波链路太短,水汽在链路上的线性累积衰减值太小,带来了不宜测量和容易受到噪声干扰等问题;相反,微波链路太长,水汽在链路上的线性累积衰减值增大,有利于测量,但自由空间损

耗和信道噪声影响增大对接收端的信号检测灵敏度更高的挑战。另一方面,因为来自微波链路的测量是线性累积的综合数据,而传统气象站利用的是点测量,且本文的气象站安放在链路的附近,未完全放置链路路径之上都会带来反演的差异。此外,链路位于具有湿度源的Göta河流的上方,而这些区域对水汽场是有影响的。除此,微波链路对机械振荡也很敏感。强风可能导致链路发射机或接收机(或两者)移动的也可能干扰精确的测量。

研究中使用的气象站资料中的温度和压力的精度分别为0.5℃和1.0hPa。根据本文的研究模型的绝对湿度计算,压力或温度的这种量级的变化并不会造成绝对湿度计算的显著变化。影响绝对湿度计算的主要不确定因素是衰减量化误差。链路的量化误差0.1 dBm,对于长度3 km的链路,评估衰减的不确定性为0.033 dBm/km。结果计算表明,该链路长度的绝对湿度计算误差为0.897 0 g/m<sup>3</sup>。

## 5 结论

介绍了一种基于微波通信链路数据的新型水汽监测方法,通过对瑞典哥德堡地区的E频段毫米波链路的一个月的数据分析,微波通讯链路反演的水汽密度结果与研究区域的地面气象站1和气象站2测量结果有很好的一致性,两者之间的相关性分别为0.89和0.97,均方根误差分别差为0.75 g/m<sup>3</sup>和0.79 g/m<sup>3</sup>;我们研究表明,利用微波链路反演水汽密度,可以为现有的天气监测网络提供额外的丰富的数据源;较好地证明了该技术在增加气象观测点数量和提高预报、临近预报和天文测量等气象服务质量方面具有巨大的潜力。然而,由于来自微波链路的反演结果是基于链路路径上衰减的线性累加,而气象站是湿度的点测量,所以会有一些差异。此外,测量地点之间的位置差异,特别是高度差异,不同高度的大气层水汽含量的差异在反演时会引入更多的差异。由于相邻链路之间的一致性有助于消除误报和错误,通过分析一个区域内多条通讯链路有望能够获得近表面水汽密度图。

作为5G的核心技术之一,毫米波有望在不久的将来被广泛应用于无线回传链路和数据传输链路。每个无线链路都可以看作是监测当地天气状况的潜在传感器节点。我们相信,利用微波链路,与现有的湿度监测方法相比,它可以提供更高的时间和空间分辨率的测量数据,可以为现有的天气监测网

络提供额外的丰富的数据源。

**致谢:**非常感谢瑞典爱立信公司的Lei Bao研究员提供高质量的微波链路数据和气象观测数据,没有他们的积极合作,这项工作是不可能完成的。感谢以色列特拉维夫大学Hagit Messer教授、Pinhas Alpert教授和他们的团队提供的分析意见。

## References

- [1] David N, Alpert P, Messer H. Novel method for water vapour monitoring using wireless communication networks measurements [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, **9**(7): 2413–2418
- [2] TUTORIALS POINT (I) PVT. LTD. Wireless Communication [M]. 2017
- [3] Li Xiao-Rong, Chen Zhang-You, Wu Zheng-Xian. Microwave technology [M]. Science Press(李晓荣, 陈章友, 吴正娟. 微波技术. 北京:科学出版社), 2005.
- [4] LIU Xi-Chuan, GAO Tai-Chang, QIN Jian, *et al.* Effects analysis of rainfall on microwave transmission characteristics [J]. *Acta Physica Sinica*(刘西川, 高太长, 秦健, 等. 降雨对微波传输特性的影响分析. 物理学报), 2010, **59**(3): 2156–2162
- [5] Leijnse H, Uijlenhoet R, Stricker JNM. Rainfall measurement using radio links from cellular communication networks [J]. *Water Resources Research*, 2007, **43**(3).
- [6] Rayitsfeld A, Samuels R, Zinevich A *et al.* Comparison of two methodologies for long term rainfall monitoring using a commercial microwave communication system [J]. *Atmospheric research*, 2012, **104**: 119 – 127.
- [7] David N, Alpert P, Messer H. The potential of commercial microwave networks to monitor dense fog—feasibility study [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2013, **118**(20): 11750 – 11761.
- [8] Overeem A, Leijnse H, Uijlenhoet R. Measuring Urban Rainfall Using Microwave Links from Commercial Cellular Communication Networks [J]. *Water Resources Research*, 2011, **47**(12): 1–16
- [9] Overeem A, Leijnse H, Uijlenhoet R. Country-wide Rainfall Maps from Cellular Communication Networks [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2013, **110**(8): 2741–2745
- [10] Overeem A, Leijnse H, Uijlenhoet R. Two and a Half Years of Country-wide Rainfall Maps using Radio Links from Commercial Cellular Telecommunication Networks [J]. *Water Resources Research*, 2016, **52**(10): 8039–8065
- [11] Chwala C, Keis F, Kunstmann H. Real-time Data Acquisition of Commercial Microwave Link Networks for Hydro-meteorological Applications [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2016, **9**(3): 991–999
- [12] Bao L, Larsson C, Mustafa M, *et al.* A brief description on measurement data from an operational microwave network in Gothenburg, Sweden: 15th International Conference on Environmental Science and Technology, 2017[C]. Rhodes, Greece: 2017: 1–5
- [13] Gosset M, Kunstmann H, Zougmore F, *et al.* Improving

- Rainfall Measurement in gauge poor regions thanks to mobile telecommunication networks [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2016, **97**(3): ES49-ES51
- [14] Doumounia A, Marielle G, Frederic C, *et al.* Rainfall monitoring based on microwave links from cellular telecommunication networks: First results from a West African test bed [J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, **41**(16):6015-6021
- [15] David N, Alpert P, Messer H. Humidity Measurements using Commercial Microwave Links [J]. *Advanced Trends in Wireless Communications*, 2012.
- [16] Alpert P, Rubin Y. First Daily Mapping of Surface Moisture from Cellular Network Data and Comparison with Both Observations/ECMWF Product [J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, **45**(16): 8619 - 8628.
- [17] LV Da-Ren, FENG Shi-Yong. Universal regression and inversion of total amount of atmospheric water vapor in ground-based microwave remote sensing [J]. *Atmospheric Science* (吕达仁, 冯士雍. 地基微波遥感大气水汽总量的普适性回归反演. 大气科学), 1993, **17**(6):721-731
- [18] Ruan Cheng-Li. Millimeter wave theory and technology [M]. University of Electronic Science and Technology Press (阮成礼. 毫米波理论与技术. 成都:电子科技大学出版社), 2000.
- [19] LIU Xi-Chuan, LIU Lei, GAO Tai-Chang, *et al.* Effect of different precipitation on characteristics of millimeter wave propagation characteristics [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (刘西川, 刘磊, 高太长, 等. 不同类型降水对毫米波传输特性的影响研究. 红外与毫米波学报), 2013, **32**(4):397-384
- [20] M. Coldrey, A. Allasia, L. Bao, *et al.* Maturity and field proven experience of millimetre wave transmission [OL]. 2015. <http://www.etsi.org/images/files/ETSIWhitePapers>.
- [21] Hansryd J, Li Y, Chen J, Ligander P, *et al.* Long Term Path Attenuation Measurement of the 71-76 GHz Band in a 70/80 GHz Microwave Link: Antennas and Propagation (EuCAP), 2010 Proceedings of the Fourth European Conference on, 2010[C].
- [22] Rappaport T S, Sun S, Shafi M. Investigation and Comparison of 3GPP and NYUSIM Channel Models for 5G Wireless Communications: 2017 IEEE 86th Vehicular Technology Conference, 2017[C]. Toronto, Canada: **2017**: 1-5
- [23] Miranda J, Abrishambaf R, Gomes T, *et al.* path loss exponent analysis in Wireless Sensor Networks: Experimental evaluation: 2013 11th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN), 2013 [C]. Bochum: **2013**: 54-58
- [24] Zinevich A, Messer H, Alpert P. Prediction of rainfall intensity measurement errors using commercial microwave communication links [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2010, **3**(5): 1385 - 1402.
- [25] Raghavan S. Radar Meteorology [M]. Dordrecht The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2003:51-9
- [26] Rec. ITU-R P.676-6, *Attenuation by Atmospheric Gases*. (2005). <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.676-6-200503-S/en>
- [27] Liebe H J. An updated model for millimeter wave propagation in moist air [J]. *Radio Science*, 1985, **20**(5): 1069-1089.