

文章编号: 2095-4980(2022)05-0424-07

毫米波雨雾颗粒环境传输测量系统

杨晓帆¹, 曾勇虎^{*1}, 刘小明^{*2}

(1. 电子信息系统复杂电磁环境效应国家重点实验室, 河南 洛阳 471003; 2. 安徽师范大学 物理与电子信息学院, 安徽 芜湖 241002)

摘要: 毫米波在颗粒环境中传输特性是毫米波通信技术的重要基础性问题。为探索毫米波传输在可控颗粒环境下的测量, 基于准光学理论设计了双反射面高斯波束传输系统。该系统包含一对多张角喇叭和两个椭球聚焦反射面。多张角喇叭用于产生高斯度大于 96% 的高斯波束; 聚焦反射面将发射波束重新聚焦, 使得输出波束参数与发射波束参数相同。此外, 基于矢量网络分析仪加扩频模块的实验方案, 对准光传输系统在 75~110 GHz 频率范围进行了测试, 得到该频率范围内整个系统的损耗。测试结果表明系统本身的损耗仅有 2~4 dB, 表现出良好的传输特性。基于本系统的初步喷水实验为可控颗粒环境下传输测量奠定了基础。

关键词: 毫米波; 椭球面; 大气传输; 衰减

中图分类号: TN911.22

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2021128

Millimeter wave transmission measurement system in particulate environments

YANG Xiaofan¹, ZENG Yonghu^{*1}, LIU Xiaoming^{*2}

(1.State Key Laboratory of Complex Electromagnetic Environment Effects on Electronics and Information System,
Luoyang Henan 471003, China;

2.School of Physics and Electronic Information, Anhui Normal University, Wuhu Anhui 241002, China)

Abstract: Millimeter wave transmission in particulate environment is a fundamental topic in the communication community. In order to make controllable measurement, a dual-reflector Gaussian beam transmission system is designed based on the quasi-optical theory. This system consists of a pair of multi-flare angle horns, and two ellipsoidal focusing reflectors. The multi-flare angle horns are employed to generate Gaussian beam with 96% Gaussianity, and the focusing reflectors transform the incident beam to be identical to the input beam. In addition, the measurement on the system loss is conducted in the range of 75~110 GHz by using a vector network analyzer and extenders. It is found that the system loss is in the range of 2~4 dB, showing a satisfactory transmission performance. The preliminary study on water-spraying paves the way for future controllable measurement.

Keywords: millimeter wave; ellipsoidal mirror; atmospheric transmission; attenuation measurement

近年来, 毫米波及太赫兹应用广泛展开, 典型应用有安检成像^[1]、毫米波通信^[2-4]、毫米波与太赫兹遥感^[5], 以及毫米波汽车雷达^[6]等。这些应用中一个重要基础问题是毫米波及太赫兹波在雨雾颗粒环境下的传输特性。电磁信号在雨雾颗粒中的传输特性将影响接收信号的强弱、系统的接收灵敏度、动态范围以及信噪比。因此, 电磁波在大气中的传输是雷达、通信领域的主要研究内容之一。现有的链路预算模型中, 电磁信号的衰减主要采用弗里斯传输公式^[7]。但是, 弗里斯传输公式主要适用于大气衰减不太严重的情形, 通常用于射频和微波频段。而对于毫米波, 由于大气中存在分子吸收峰效应, 大气传输衰减的影响并不能简单忽略。因此采用弗里斯传输公式去描述毫米波及太赫兹波的传输容易产生较大的偏差^[8]。事实上, 比较有效的方法是在弗里斯传输公式的基础上增加无线电波在大气中的衰减^[9], 即采用国际电信联盟标准 ITU-R P.676-11。该标准考虑了水汽和各种气体分子的影响, 建立了 1~1 000 GHz 范围内的大气衰减模型。但是, 该标准对于有其他颗粒物(如降雨、降雪、雾霾、粉尘)存在的情形, 并未给出具体的计算方法。因此, 研究可控环境下毫米波在雨雾颗粒中的传输特性具

收稿日期: 2021-03-02; 修回日期: 2021-04-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61871003); CEMEE 国家重点实验室基金资助项目(CEMEE2021Z0201B)

*通信作者: 曾勇虎 email:zengyonghu@sina.com; 刘小明 email:xiaoming.liu@ahnu.edu.cn

有基础性意义。而开发可控性强、系统损耗小的实验系统是进行该项研究的关键之一。

目前，国内外已有多家单位在研究实验室环境下用于测量毫米波传输的可控装置。例如：西安电子科技大学与中国电波传播研究所合作，采用了准光结构研究 0.34 THz 电磁信号的传输特性^[10]；美国俄克拉荷马州州立大学研究组采用太赫兹时域光谱系统在室内测试了太赫兹波的传输特性^[11]；美国新泽西理工学院采用类似于时域光谱系统测试了太赫兹波在充满人造灰尘的腔体内的传输特性^[12]。但上述几个系统的主要缺点是环境可控性不强，无法定量模拟实际情形。另外，以上系统还存在损耗过大、动态范围有限的缺点。因此，对毫米波太赫兹传输特性的测量工作还需进一步研究，而开发可控性强的测量系统有利于传输特性测量的顺利进行。

准光学技术主要基于高斯波束理论，具有损耗小、带宽大、多极化的优势，特别适合于研究毫米波及太赫兹波在大气中的传输特性^[13]。本文讨论了高斯波束传播的基本原理，推导了高斯波束转换公式，并基于该理论设计了 75~500 GHz 的双反射镜准光系统。同时，本文还展示了基于矢量网络分析仪加扩频头方案的测试结果。最后，对可控测量方案进行了设计和初步实验。

1 准光学基本理论

1.1 高斯波束传播

高斯波束传播是基于近轴近似理论来求解亥姆霍兹波动方程。近轴近似理论认为从馈源发出的电磁波主要集中在靠近传播轴一个角度范围之内，通常是 30° 左右。

在近轴近似的条件下，高斯基模在柱坐标下的表达式为：

$$E(r, z) = \sqrt{2/(\pi w^2)} e^{-\frac{r^2}{w^2} - jkz - j\frac{\pi r^2}{2R} - j\varphi_0} \quad (1)$$

其中，高斯波束的波前曲率半径为

$$R = z + \pi w_0^2 / (\lambda) \quad (2)$$

高斯波束的波束半径为：

$$w = w_0 \left[1 + (\lambda z / \pi)^2 / w_0^2 \right]^{0.5} \quad (3)$$

另外， w_0 为高斯波束束腰大小，表示波束半径的最小值。而相位偏移量可以表示为

$$\tan \varphi_0 = \lambda z / (\pi w_0^2) \quad (4)$$

高斯波束在传播过程中，其最大场值在减小，但其横截面的幅度分布仍然是高斯分布，因而称为高斯波束。另外，其波束半径以及其波前曲率半径随传播在增大，如图 1 所示。因此，只要确定工作频率和束腰大小，就能完整地描述高斯波束。

从波束半径的定义可知

$$\frac{E(w, z)}{E(0, z)} = \frac{1}{e} \quad (5)$$

因此，波束半径的定义是指横截面上某点的电场幅度下降到最大电场值的 $1/e$ (-8.686 dB) 时，该点到传播轴的距离。另外，在远场区可以得到

$$w/R \approx \lambda / (\pi w_0) = \tan \theta_0 \quad (6)$$

这是一个渐近线方程，该方程表明波束半径在远场与传播轴的夹角是一个固定值 θ_0 ，称为扩散角。并且在小角度情况下有：

$$\theta_0 = \lambda / (\pi w_0) \quad (7)$$

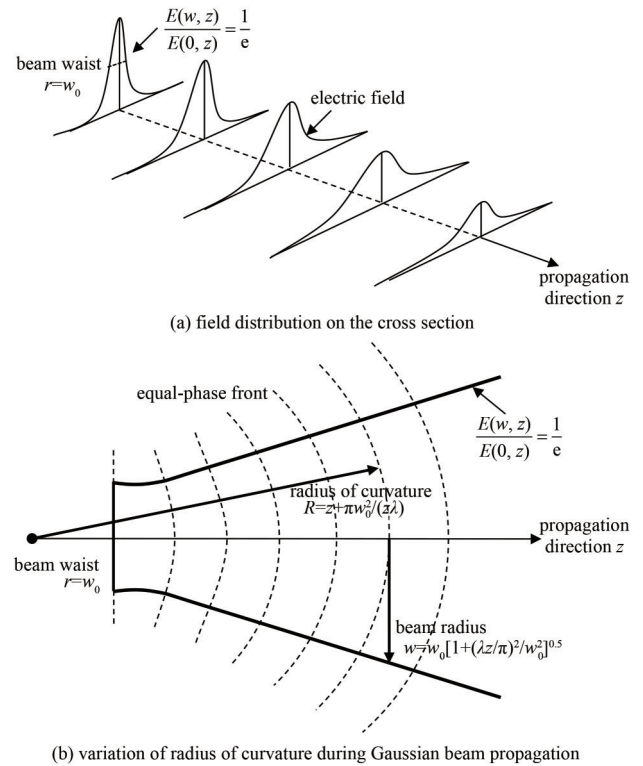


Fig.1 Gaussian beam propagation and its parameters
图 1 高斯波束的传播特性及其参数

最后, 高斯波束还可以由复波束参数 q 表示, 即

$$e^{-\frac{r^2}{w^2} - j\frac{\pi r^2}{\lambda R}} = e^{-j\frac{kr^2}{2q}} \quad (8)$$

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{R} - \frac{j\lambda}{\pi w^2} \quad (9)$$

从复波数参数表达式可以看出, 高斯波束有类球面波的性质, 这与几何光学中描述光线的曲率半径的表达式十分相似。并且, 利用该性质可以实现高斯波束的转换。

1.2 高斯波束转换

高斯波束在传播过程中有一定的扩散, 若扩散过于严重, 容易造成功率密度下降, 不利于后端信号处理。因此, 在传输过程中应当对高斯波束进行重新聚焦, 使之成为另一高斯波束。一般情况下采用焦距为 f 的聚焦单元, 可以把高斯波束按以下公式进行变换

$$\begin{cases} \frac{d_{\text{out}}}{f} = 1 + \frac{\frac{d_{\text{in}}}{f} - 1}{\left(\frac{d_{\text{in}}}{f} - 1\right)^2 + \frac{z_c^2}{f^2}} \\ w_{0,\text{out}} = \frac{w_{0,\text{in}}}{\left[\left(\frac{d_{\text{in}}}{f} - 1\right)^2 + \frac{z_c^2}{f^2}\right]^{0.5}} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $d_{\text{in}}, d_{\text{out}}, w_{0,\text{in}}$ 和 $w_{0,\text{out}}$ 分别是高斯波束输入距离、输出距离、输入高斯波束束腰以及输出高斯波束束腰。而 z_c 为共焦距离:

$$z_c = \pi w_{0,\text{in}}^2 / \lambda \quad (11)$$

可以看出, 当 $d_{\text{in}} = f$ 时, 输出距离 d_{out} 恒为 f , 与频率无关。该结论是设计宽带系统的理论基础。

对于某一特殊情形, 当两个镜面的距离为 $2f$, 即 $f_1 = f_2 = f$ 以及 $d_1 + d_2 = 2f$ 时, 就可以得到 $w_{0,\text{out}} = w_{0,\text{in}}$ 。也就意味着在这种情况下, 输出束腰的大小和位置都与频率无关。这种架构称为高斯望远镜。

2 准光系统设计

2.1 椭球镜面

椭球镜面由于是二次曲面, 具备了聚焦的基本特性。因此, 椭球镜面是准光系统中的关键器件之一。对于一个椭球镜面, 其主要参数为 R_1, R_2 和 θ , 如图 2 所示。其等效焦距为

$$f = R_1 R_2 / (R_1 + R_2) \quad (12)$$

R_1, R_2 和 θ 的选择需要考虑系统的实际应用。在本研究中, 传输距离不能过小, 否则大气损耗过小, 容易引起较大的误差。但是传输距离过大又容易导致镜面过大。通常情况下, 镜面直径 D 的选择必须大于 4 倍的高斯波束半径, 即通过式(3)即可求得。综合考虑以上因素, 本文选取的椭球镜面主要参数如表 1 所示。

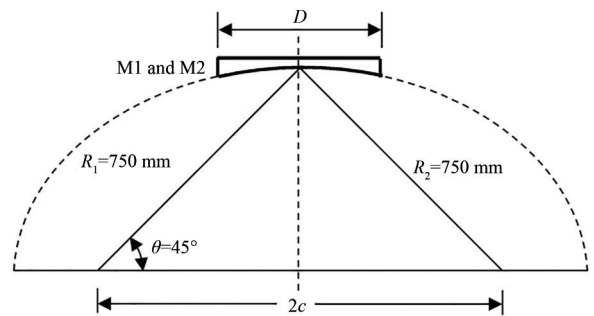


Fig.2 Design of ellipsoidal mirror
图 2 椭球镜面的设计

表 1 椭球镜面的主要参数

Table1 Main parameters of the ellipsoidal mirror

reflector	R_1/mm	R_2/mm	$\theta/(\text{°})$	D/mm
M1	750	750	45	220
M2	750	750	45	220

2.2 多张角馈源

馈源喇叭是准光系统的发射和接收器件。性能最优的喇叭为波纹喇叭，缺点是结构复杂，加工难度大^[14]。因此，本文采用的是多张角馈源，它能在中心频段保证较好的高斯特性，且能大大降低加工成本^[15]。图 3 为多张角喇叭天线的结构示意图，这种结构的喇叭天线分为 4 段^[16]，其中第 1 段为波导段，第 2、3、4 段为张角变化段。通过张角的突变来实现 TM₁₁ 模式的激发以及系数 β 的控制。注意，由于矩圆转换已经是标准化器件，因此本文未画出。本文的实验频段为 75~110 GHz，该频段喇叭天线对应的参数如表 2 所示。要说明的是，对于其他频段的喇叭，需要重新调整尺寸参数，使得各频段馈源达到合适的方向图。

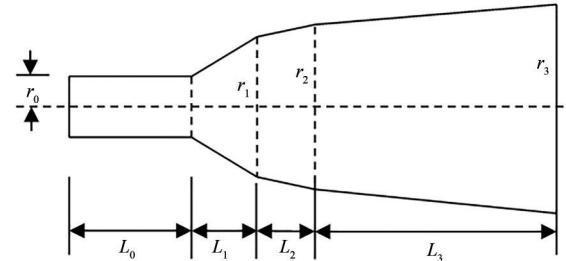


Fig.3 Multi-flare angle feed horn
图 3 多张角喇叭结构图

表 2 多张角喇叭的主要参数

Table 2 Main parameters for the multi-flare angle feed horn in mm

r_0	r_1	r_2	r_3	L_0	L_1	L_2	L_3
1.58	3.80	4.63	9.33	30	3.78	3.10	61.33

图 4(a) 为多张角喇叭天线在中心频点 90 GHz 处的辐射方向图，图中展示了 0° 以及 90° 两个主截面。从图中主截面可以看出，第一旁瓣电平在 -25 dB 以下，两个截面的对称性十分良好(主瓣互相重合)。另外，给出了三维方向图，三维方向图同样表现出良好的高斯性和圆对称性。

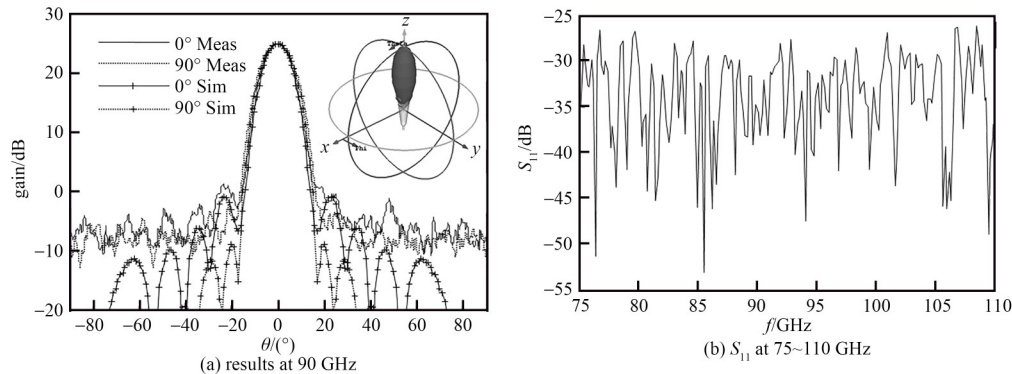


Fig.4 Simulation and measured results of the feed horn
图 4 多张角喇叭仿真测试图

图 4(a) 还给出了多张角喇叭的测试结果，测试采用了紧缩场的测量方法。从仿真和测试结果可以看出，测试结果与仿真结果吻合度很高，矢量高斯度超过 96%。说明该喇叭的性能可以满足毫米波与太赫兹传输的要求。此外，测试方向图也有很好的对称性。

由此可知，该设计能够满足本系统的测试要求。图 4(b) 是测试的反射系数，从结果中可见，反射系数全部在 -25 dB 以下，体现出良好的匹配特性。

2.3 系统仿真结果

最终的系统采用了双反射镜结构，如图 5 所示。该结构具有高斯望远镜的特点。其中有两个地方的性能比较重要，即中间束腰位置和出射束腰位置。为评估系统的电性能，采用物理光学法对系统进行仿真。物理光学法是一种特别适合反射面系统仿真的高频分析方法^[17]。仿真按频段覆盖了 75~500 GHz，比测试频段有所扩展，目的是为后续测试预留扩展空间。需要注意的是，在其他频段，需要考虑吸收峰对传输的影响，防止测量方法出现较大误差。仿真结果如图 6 所示，从仿真结果可以看出，接收喇叭处的波束大小基本不随频率变化，且与输入束腰的大小基本相同。因此收发馈源可以完全相同，从而减少设计工作量并降低加工成本。在 100 GHz 左右存在衍射条纹。这是由于在低频情况下，衍射效果更加明显，但衍射信号相对主波束在 -25 dB 以下，对信号收发影响不大。在高频情况下，衍射效果基本上没有出现在仿真结果中。

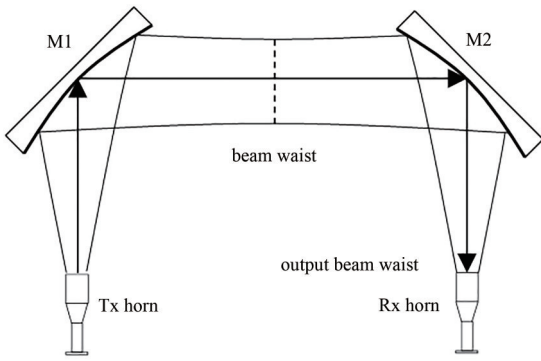


Fig.5 Diagram of the quasi-optical system
图5 准光光路示意图

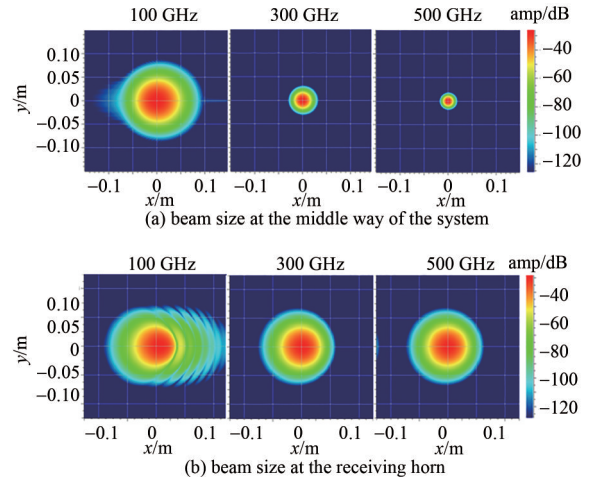


Fig.6 Simulation results of the quasi-optical system
图6 系统仿真结果图

3 系统测试

3.1 系统结构图

实验系统如图7所示，毫米波喇叭天线后端与75~110 GHz扩频模块连接，扩频模块与矢量网络分析仪相连。首先，矢量网络分析仪生成基频信号，通过扩频头产生75~110 GHz的信号并输入到毫米波角锥喇叭；而后，毫米波喇叭天线发射的信号经过反射体聚焦后通过窗口进入大气室，同时通过窗口投射到另一反射体；继而，由第二个反射体将能量聚焦到大气室另一端的毫米波喇叭以实现信号接收；最后，毫米波喇叭天线接收的电磁信号通过扩频模块，下变频到基频进入矢量网络分析仪，通过矢量网络分析仪得到传输参数。

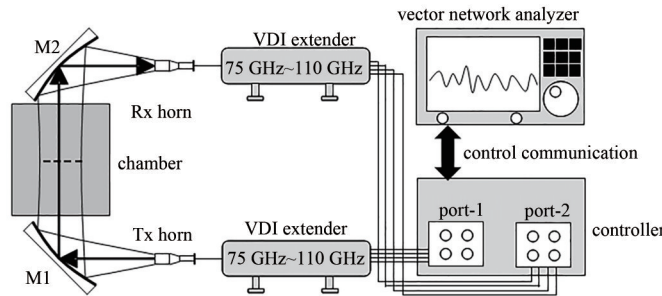


Fig.7 Diagram of the measurement system
图7 实验系统框图

3.2 测试结果

本次性能测试实验采用基于矢量网络分析仪加扩频模块的方案。实验仪器包括矢量网络分析仪(型号AV3672D)、毫米波扩频控制机(型号AV3640A)以及67~110 GHz毫米波扩频模块(型号VDI WR 10+)，如图8所示。实验方案设置流程如下：1) 按矢量网络分析仪工作要求，预热30 min，使测试系统处于稳定状态；2) 将扩频头直接相连，测试得到系统基准损耗，如图9所示。这是因为在现场测试环境中很难实时校准，因此采用背景测量作为传输校准以模拟实际情形；3) 将矢量网络分析仪与扩频模块连接到光路系统。

将图9中整个系统的传输参数减去扩频头对扩频头的传输参数，可以得到系统本身的损耗特性。从图中可以看出，损耗的最大值在2~4 dB之间，说明系统

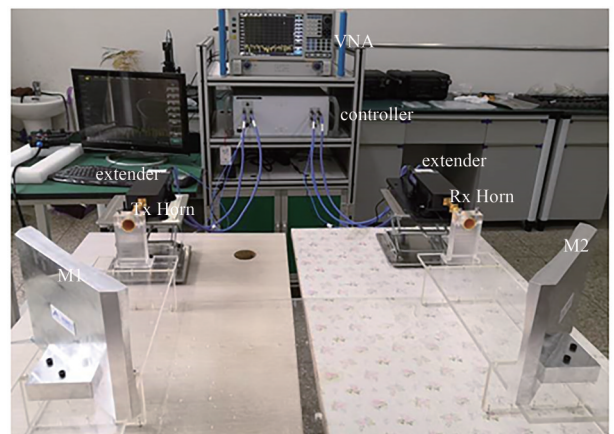


Fig.8 Photograph of the system
图8 光路的实验测试

的传输特性很好。此外，随着频率的升高，传输系数有下降的趋势。这主要是由空气中的水汽对高频毫米波衰减更大所造成。

3.3 雨雾测量方案设计

为实现大气传输的可控测量，本文还设计了一套大气室，如图 10 所示。大气室的四周由亚克力板密封，留有两个窗口供波束进出，窗口采用薄膜材料密封。密封薄膜材料基本不影响电磁波的透射。四周壁上铺有毫米波吸波材料，防止杂散波产生干扰。顶部上盖留有进气口/喷雾口。研究人员可根据具体工作注入其他样品，例如雾霾或粉尘。

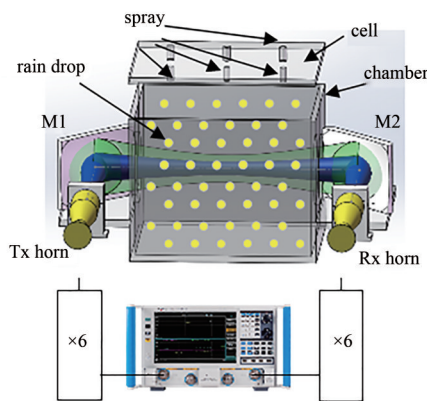


Fig.10 Mimic system
图 10 大气传输模拟测量方案

如何模拟雨雾的制备不是本文的研究重点，有一些研究者开展了该方面的研究^[18]。但为了演示本系统的可行性，设置了 3 个喷头，均匀分布在上盖面板。喷头的喷水速度是可控的。这里展示了 3 个等级的喷水速度：0.2 L/min, 0.4 L/min, 0.6 L/min。在测量整个系统的背景后，分别对 3 种喷速环境进行测量。测量的结果如图 11 所示。

从图 11 可以看出，不同流速下，衰减特性存在差异，流速越高衰减越大。另外，衰减表现出随频率变化具有波动性的特点，可能是由于喷头不均匀使得大气室内水滴非均匀分布而导致。后续工作中，可参考降雨模拟标准去进一步改善顶盖设计。本文中的初步实验表明，该系统能够反映不同强度的喷洒具有不同衰减这一事实，为后续更准确的测量奠定了实验基础。

4 结论

本文描述了一套用于研究毫米波及太赫兹波大气传输测量的准光实验系统。从仿真结果看，该系统具备了宽频带工作特性，并且在接收喇叭处具备波束大小不变化的特性。基于矢量网络分析仪加扩频头方案，设计了实验方案。通过在 75~110 GHz 频率范围内实测可以发现，该系统的传输损耗较小，仅为 2~4 dB，有利于毫米波在雨雾颗粒环境中传输特性的后续测量。进行了初步测量，发现了传输衰减随喷洒强度增强而增加这一事实，为后续定量测量奠定了实验基础。后续工作将进一步研究可控喷洒，实现高精度雨雾、颗粒模拟测量。

参考文献：

[1] 洪伟,余超,陈继新,等. 毫米波与太赫兹技术[J]. 中国科学:信息科学, 2016,46(8):1086-1107. (HONG Wei, YU Chao, CHEN

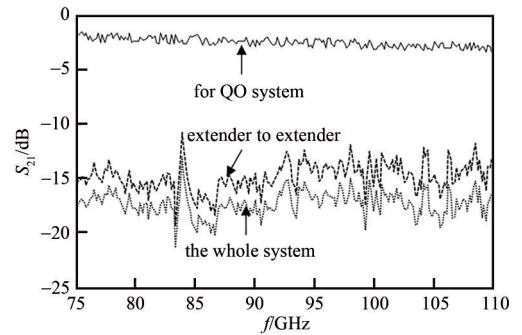


Fig.9 Background attenuation of the system
图 9 准光光路衰减特性测量结果图

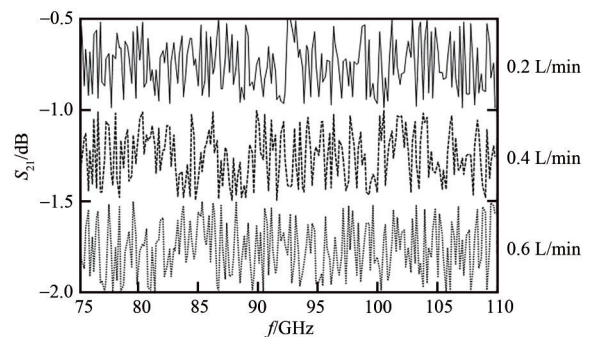
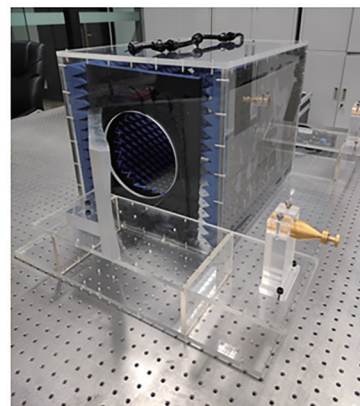


Fig.11 Measured results under different speeds
图 11 不同流速下的测量结果图

- Jixin, et al. Millimeter wave and terahertz technologies[J]. China Science:Information Science, 2016,46(8):1086–1107.)
- [2] 赵明明,余建军. 太赫兹通信系统的研究现状与应用展望[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018,16(6):931–937. (ZHAO Mingming, YU Jianjun. Terahertz communication system: present and outlook[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018,16(6):931–937.)
- [3] 田浩宇,唐盼,田磊,等. 基于信道测量的短距离太赫兹信道特性分析[J]. 北京邮电大学学报, 2020,43(6):71–80. (TIAN Haoyu, TANG Pan, TIAN Lei, et al. Analysis of short-distance terahertz channel characteristics based on channel measurements[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2020,43(6):71–80.)
- [4] 熊子康,何敬锁,武晓磊,等. 310 GHz 太赫兹通信系统设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2020,18(3):369–373. (XIONG Zikang, HE Jingsuo, WU Xiaolei, et al. Design of 310 GHz terahertz communication system[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2020,18(3):369–373.)
- [5] LIU X, YU H, GAN L. A Gaussian beam method for push broom antenna design[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020,68(12):8144–8149.
- [6] PAN M, CHOPARD A, FAUQUET F, et al. Guided reflectometry imaging unit using millimeter wave FMCW radars[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2020,10(6):647–655.
- [7] BALANIS C A. Antenna theory analysis and design[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2005.
- [8] HAN C, DUAN S. Impact of atmospheric parameters on the propagated signal power of millimeter-wave bands based on real measurement data[J]. IEEE Access, 2019(7):113626–113641.
- [9] Recommendation ITU-R P.676–11–2016, Attenuation by atmospheric gases[S]. 2016.
- [10] 卢昌胜,李海英,林乐科. 0.34 THz 大气传播测试系统设计[J]. 微波学报, 2016,32(3):78–81. (LU Changsheng, LI Haiying, LIN Leke. Design of atmospheric propagation measurement system at 0.34 THz[J]. Journal of Microwave, 2016,32(3):78–81.)
- [11] YANG Y, MANDEHGAR M, GRISCHKOWSKY D R. Broadband THz signals propagating through dense fog[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014,27(4):383–386.
- [12] MA J, VORRIUS F, LAMB L. Comparison of experimental and theoretical determined terahertz attenuation in controlled rain[J]. Journal of Infrared Millimeter and Terahertz Waves, 2015,36(12):1195–1202.
- [13] GOLDSMITH P F. Quasioptical systems: Gaussian beam quasioptical propagation and applications[M]. New York: Wiley Press, 1998.
- [14] MONTOFRÉ D A, MOLINA R, KHUDCHENKO A, et al. High-performance smooth-walled horn antennas for THz frequency range: design and evaluation[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2019,9(6):587–597.
- [15] 刘小明,于海洋,王海,等. 多模式超高斯馈源的设计与分析[J]. 上海航天, 2018,35(2):97–102. (LIU Xiaoming, YU Haiyang, Wang Hai, et al. Design and analysis of multi-mode super Gaussian feed[J]. Aerospace Shanghai, 2018,35(2):97–102.)
- [16] LIU X, WANG Y, ZHANG T, et al. A compact multiband quasi-optical system for plasma detection[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020,68(6):4916–4924.
- [17] PAVONE S C, MAZZINGHI A, ALBANI M. PO-based automatic design and optimization of a millimeter-wave sectoral beam shaped reflector[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020,68(6):4229–4237.
- [18] CHOWDHURY M N, TESTIK F Y, HORNACK M C, et al. Free fall of water drops in laboratory rainfall simulations[J]. Atmospheric Research, 2016,168(1):158–168.

作者简介:

杨晓帆(1985-), 男, 福建省莆田市人, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为太赫兹传输特性. email: xiaofan_uestc@sina.com.

曾勇虎(1972-), 男, 江西省赣州市人, 博士, 研究员, 主要研究方向为太赫兹传输、复杂电磁环境.

刘小明(1983-), 男, 江西省永丰县人, 博士, 教授, 主要研究方向为准光技术.