

文章编号: 2095-4980(2020)01-0006-04

122 GHz 毫米波在管状结构内的传输特性

姚金杰¹, 王 闽¹, 韩 焱¹, 高 凯², 贺冠华², 郭 华²

(1.中北大学 信息探测与处理山西省重点实验室, 山西 太原 030051; 2.中国兵器工业集团 淮海工业集团, 山西 长治 046012)

摘 要: 雷达测速是管状结构内运动参数测试系统的重要手段, 提高雷达工作频率可有效提高测速精确度和分辨力。在 122 GHz 毫米波可用性分析的基础上, 分别建立了管径和管壁粗糙度对毫米波传输的衰减常数计算模型。仿真结果表明: 随着管状结构管径的不断增大, 衰减常数趋于减小; 管壁粗糙度在 5 μm 内, 衰减常数急剧增大; 大于 5 μm 后, 衰减常数趋于平稳, 该结果进一步证明了 122 GHz 毫米波在身管等管状结构毫米波测速的可行性。

关键词: 太赫兹; 粗糙度; 衰减常数; 传输特性

中图分类号: TN957

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2018304

Transmission characteristics of 122 GHz millimeter waves in tubular structures

YAO Jinjie¹, WANG Min¹, HAN Yan¹, GAO Kai², HE Guanhua², GUO Hua²

(1.Shanxi Key Laboratory of Signal Capturing & Process, North University of China, Taiyuan Shanxi 030051, China;

2.Huaihai Industrial Group Co., LTD Norinco Group, Changzhi Shanxi 046012, China)

Abstract: It is an important method of radar velocity measurement for measuring motion parameters in tubular structures. It can improve the accuracy and resolution of velocity measuring by improving the working frequency of radar. Based on the availability analysis of 122 GHz millimeter wave, the attenuation constant of pipe diameter and pipe wall roughness for millimeter wave transmission is established respectively. The simulation results show that the attenuation constant tends to decrease with the increasing of the pipe diameter. The attenuation constant tends to be stable when the tube wall roughness is larger than 5 μm ; and the attenuation constant increases sharply when the tube wall roughness is less than 5 μm . This result further proves the feasibility of the speed measurement of 122 GHz millimeter wave in the tube and other tubular structures.

Keywords: terahertz; roughness; attenuation constant; transmission characteristic

测速雷达是身管、风洞、储能器等管状结构内运动目标非接触测试的重要手段^[1-2], 对于火炮、枪械等身管类武器装备, 利用测速雷达不仅能够实现高速运动目标动态挤进过程中的速度测量, 计算目标运动加速度、位移和弹底压力等运动参数, 评价目标运动规律, 也能够分析火药、推进剂等燃烧特性, 完成身管磨损、内膛质量等故障检测^[3-5]。因此, 开展管状结构内目标测速方法研究具有极其重要的工程应用价值。目前, 管状结构内测速雷达工作频率主要集中在 9.6 GHz, 24 GHz, 37.5 GHz, 77 GHz, 95 GHz 等频点^[6-7]。当对同一目标进行测速时, 工作频率更高, 多普勒效应会更显著, 测速的速度分辨精确度也会更高, 测量更低速目标的能力更强。太赫兹波频率范围在 0.1~10 THz 之间, 频率高, 且具有穿透能力强、相干性、瞬态性等特点^[8]。基于此, 在分析 122 GHz 频率段可用性的基础上, 重点研究 122 GHz 毫米波在管状结构内的传输特性。

1 122 GHz 毫米波可用性分析

根据多普勒原理可知, 多普勒频率与发射机工作频率成正比, 利用多普勒频率可以完成目标运动速度测量。设 v 为运动速度, f_d 为多普勒频率, c 为电磁波速度, f_0 为雷达发射机工作频率, 则管状结构内目标运动速度可

收稿日期: 2018-09-15; 修回日期: 2019-03-18

作者简介: 姚金杰(1982-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为微波毫米波测试技术。email: yyyjinjie@163.com

表示为：

$$v = f_d c / 2f_0 \quad (1)$$

根据多普勒原理，在 10 m/s, 100 m/s, 1 000 m/s 这 3 种情况下，分别计算其多普勒频率，如表 1 所示。

表 1 不同频率段多普勒频率对应表
Table 1 Doppler frequency correspondence table in different frequency bands

f_0/GHz	f_d/kHz		
	10 m/s	100 m/s	1 000 m/s
1 (L band)	0.066 7	0.666 7	6.67
3 (S band)	0.200 0	2.000 0	20.00
6 (C band)	0.400 0	4.000 0	40.00
10 (X band)	0.667 0	6.670 0	66.70
15 (Ku band)	1.000 0	10.000 0	100.00
35 (Ka band)	2.330 0	23.300 0	233.00
95 (W band)	6.300 0	63.000 0	633.00
122	8.100 0	81.300 0	813.30

从表 1 可以看出，122 GHz 波段在低速段 10 m/s 对应多普勒频率为 8.1 kHz，由于微波滤波器在低频段截止频率很难做得很低，因此，低频段工作雷达测速范围也很难达到 10 m/s；另外，电磁波在管状口径内的传播，工作频率越高，雷达波长越短，越容易满足小口径管状结构的测试需求。与其他波段相比，122 GHz 频段带宽更宽，测速范围更容易扩大，尤其在低速段的测试效果会得到有效提升，更容易满足枪械等小口径膛内运动参数测试需求。因此，使用 122 GHz 毫米波进行管状结构内目标测速具有很强的优势。

2 传输特性分析

在管状结构内，122 GHz 毫米波传输时，主要受管壁、运动目标的散射、空气电离等影响。管径的粗细会使毫米波传输的路径不同，而空气电离主要发生在目标高速运动时。运动目标确定的情况下，则主要考虑管径和管壁对毫米波传输特性的影响。

2.1 管径对传输特性的影响

身管、管道等管状结构为空心圆形金属管道，可将其看作一种特殊的圆波导，不考虑弯曲、变径等特殊情况，将其简化为直行的导波装置。根据波导定义，太赫兹波在其内的传输可看作是波导传输，可以利用圆形波导传输理论对 122 GHz 毫米波在管状结构内的传输进行分析。

根据麦克斯韦方程组及圆形波导边界条件可知：只有当传输波长 λ 小于截止波长 λ_c ，毫米波才能以 TE 模或 TM 模的形式在波导内传播；反之，则截止。在所有传输模式中，TE₁₁ 模为主模，其截止波长大于其他模式的截止波长。毫米波在大长径比管状结构内传输的条件可表示为： $\lambda < \lambda_c(\text{TE}_{11})$ 。已知 $\lambda_c(\text{TE}_{11})$ ，则管状结构内传输条件为^[9-10]： $\lambda < 3.41a$ ，其中 a 为管状结构半径。频率 $f=122$ GHz 的电磁波其传输波长 $\lambda=2.5$ mm，可知 $a > 0.73$ mm，即管状结构内半径大于 0.73 mm，122 GHz 毫米波可在其中传输。当 $2.62a < \lambda < 3.41a$ 时，只能传输主模 TE₁₁ 模，最适合进行毫米波测试；当 $\lambda < 2.62a$ 时，则为传输的多模区，需要考虑各种模式传输功率之和。

在管状结构内，电场和磁场将按 $e^{-\beta z}$ 规律衰减，传输功率 P 按 $e^{-2\beta z}$ 规律衰减，即

$$P = P_0 e^{-2\beta z} \quad (2)$$

式中： P 为在传输距离 z 处的功率； P_0 为毫米波初始功率值； z 为传输距离； β 为衰减常数，其中， $\beta = \alpha_c + \alpha_d$ ， α_c 为导体衰减常数， α_d 为介质衰减常数。当管状结构内填充介质为空气时，由于空气引起的介质损耗远小于管壁引起的导体损耗，可将其忽略。122 GHz 毫米波在管状结构内的传输模式有 TE 模和 TM 模 2 种，则导体衰减常数可分别表示为：

$$\begin{cases} \alpha_c(\text{TE}_{mn}) = \frac{R_s}{\alpha \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda \mu'_{mn}}{2\pi\alpha}\right)^2}} \left[\left(\frac{\lambda \mu'_{mn}}{2\pi\alpha}\right)^2 + \frac{m^2}{(\mu'_{mn})^2 + m^2} \right] \\ \alpha_c(\text{TM}_{mn}) = \frac{R_s}{\alpha \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda \mu_{mn}}{2\pi\alpha}\right)^2}} \end{cases} \quad (3)$$

式中: R_s 为管壁表面阻抗; μ 为磁导率; ε 为介电常数; μ_{mn} 和 μ'_{mn} 分别为第一类贝塞尔函数与第一类贝塞尔函数导函数的解。

2.2 管壁对传输特性的影响

由于管状结构内工作环境是受限空间, 受管壁粗糙面影响, 会产生除直射波以外的大量反射波和散射波, 传输损耗严重。目前, 解决粗糙面散射的方法有基尔霍夫近似法和微扰法等^[11-12]。基尔霍夫法通常适用于解决起伏比较平缓的粗糙壁面; 微扰法能够适用于表面均方高度远小于波长的粗糙面。由于研究的管状结构腔线深度远小于毫米波波长, 因此建立表面均方高度模型, 利用半经验公式表征传输衰减, 采用微扰法研究粗糙管壁对毫米波传输性能的影响。依据文献[13], 将结构表面粗糙度均方根为自变量的数学函数作为修正系数, 给出管壁粗糙度前后毫米波衰减常数之间的半经验公式, 以此开展管壁粗糙度对毫米波损耗研究。

$$\alpha'_c = \alpha_c \left[1 + \frac{2}{\pi} \arctan 1.4 \left(\frac{\Delta}{\delta} \right)^2 \right] \quad (4)$$

式中: α'_c 为考虑管壁粗糙度后管状结构内电磁波衰减常数; Δ 为管状结构管壁内表面均方根高度; δ 为趋肤深度, 与毫米波频率和导体电阻率有关^[14-15]:

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} = \frac{1}{\sqrt{\pi\mu\sigma f}} \quad (5)$$

式中: ρ 为管状结构金属管壁材料的电阻; σ 为管状结构金属管壁材料的电导率。

3 仿真及结果分析

由于身管为特种钢制管道, 其电导率 σ 为 1.8×10^6 S/m, 磁导率 μ 为 $4\pi \times 10^{-7}$ H/mm, 管状结构内填充介质为空气时, 其介电常数 ε 为 8.85×10^{-12} F/m, $R_s=1.702$, 管状结构直径在 30~155 mm 之间变化, 则 122 GHz 毫米波在管状结构内的衰减常数随直径变化关系如图 1 所示。

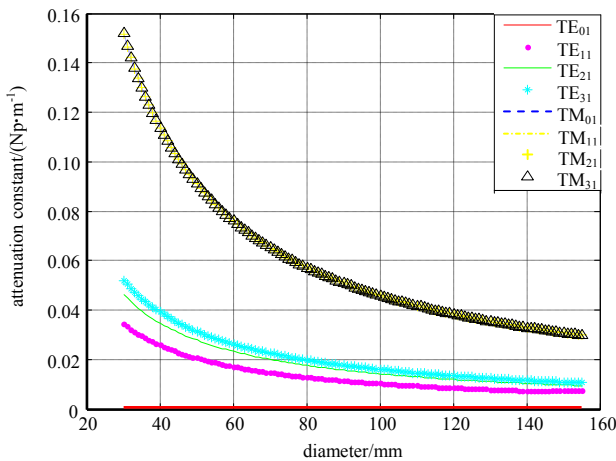


Fig.1 Attenuation constant varies with the diameter of the tube
图 1 衰减常数随管状直径变化关系

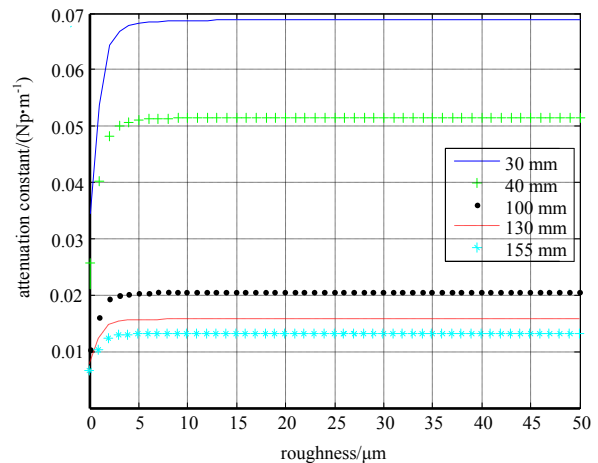


Fig.2 Attenuation constant varies with roughness
图 2 衰减常数随粗糙度变化关系

从图 1 中可以看出, TE 模的衰减常数明显比 TM 模小, TE₀₁ 模比其他模式的 TE 模衰减常数要小; TM 模衰减常数相差不大, 整体随直径增大呈下降趋势。这是因为管状结构直径减小, 各种模式的电磁波在管状结构内反射、散射损耗等增大, 衰减加剧, 毫米波在其中传播趋向于波导模式; 当管径增大时, 高频率、短波长电磁波在其中传输趋向于自由场模式, 即管状结构直径越大, 122 GHz 毫米波衰减常数越小。

根据式(5)可知, 在工作频率和材料特性确定的情况下, 电磁波趋肤深度也为定值, 影响导体衰减常数的因素仅为管状结构内表面粗糙度。从图 2 可以看出, 随着粗糙度的增加, 导体衰减常数逐渐增加到一定限值后趋于平稳。综合不同口径条件下衰减常数随粗糙度变化的情况可知, 粗糙度 5 μm 为一明显阈值。当粗糙度 < 5 μm 时, 衰减常数增幅较大; 当粗糙度 > 5 μm 时, 衰减常数趋于定值, 管状结构直径越大, 衰减常数越小。由此表明, 管状结构表面粗糙度与趋肤深度的比值在一定范围内对 122 GHz 毫米波传输产生较为明显的影响。尤其是, 随着

粗糙度的变化,管状结构内壁的粗糙度将会使导体衰减常数增大将近一倍,致使传输损耗增加,大大缩短了传输距离。

4 结论

通过仿真分析管径和管壁对 122 GHz 毫米波在管状结构中的传输影响可以看出:随着管径的增大,衰减常数逐渐减小;随着粗糙度的不断增大,衰减常数也逐渐增大,但粗糙度大于 $5\text{ }\mu\text{m}$ 后,衰减常数趋于恒定。该结果对于 122 GHz 太赫兹波用于测速雷达管状结构内目标运动参数测试提供了物理层面的依据,对提高测速精确度、扩展测速范围提供了改进手段。

参考文献:

- [1] 张亚婷. 毫米波多普勒雷达收发前端关键技术研究[D]. 成都:电子科技大学, 2015. (ZHANG Yating. Research on the key technology of millimeter wave Doppler radar transmit and receive front end[D]. Chengdu,Sichuan,China: University of Electronic Science and Technology of China, 2015.)
- [2] 姚金杰,焦丽,王闯,等. 一种面向液压储能器的 122 GHz FMCW 测距雷达[J]. 微波学报, 2018,34(6):84-87. (YAO Jinjie,JIAO Li,WANG Min,et al. A 122 GHz FMCW ranging radar for hydraulic accumulator[J]. Journal of Microwave, 2018,34(6):84-87.)
- [3] PAULI M,GÖTTEL B,SCHERR S,et al. Miniaturized millimeter-wave radar sensor for high-accuracy applications[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2017,65(5):1707-1715.
- [4] MYERS Seth,ZAPATA-RAMOS Paul. Application of W-band Doppler radar to railgun velocity measurements[J]. Procedia Engineering, 2013(58):369-376.
- [5] KO D S,BAEK T J,LEE S J,et al. Transceiver module using GaAs Gunn diode and Schottky diode mixer for W-band FMCW radar sensor[C]// 2011 8th European Radar Conference. Manchester,UK:IEEE, 2011:81-84.
- [6] VERMA Y K,VERMA U P,SHINDE G R. A highly compact and high performance MMW monopulse transceiver for airborne radar applications[C]// 2013 IEEE MTT-S International Microwave and RF Conference. New Delhi,India:IEEE, 2013:1-4.
- [7] NAVA F,SCHEYTT C J,ZWICK T,et al. Ultra-compact 122 GHz radar sensor for autonomous aircrafts[J]. Procedia Technology, 2016(26):399-404.
- [8] 董群锋,郭立新,李应乐,等. 沙尘暴对太赫兹波传播的影响[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018,16(4):599-602. (DONG Qunfeng,GUO Lixin,LI Yingle,et al. Effect of sand and dust storms on terahertz electromagnetic wave propagation characteristics[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018,16(4):599-602.)
- [9] 谷峥. 金属管道内短距离无线传输特性研究[D]. 南充:西南石油大学, 2015. (GU Zheng. Study on short distance wireless transmission characteristics in metal pipeline[D]. Nanchong,Sichuan,China:Xinan Petroleum University, 2015.)
- [10] 焦重庆,罗积润. 有损金属圆波导中电磁波传输特性的研究[J]. 物理学报, 2006,55(12):6360-6367. (JIAO Chongqing, LUO Jirun. Propagation of electromagnetic wave in a loss cylindrical waveguide[J]. Acta Physical Sinica, 2006,55(12): 6360-6367.)
- [11] 张冰丽,成凌飞,高慧,等. 粗糙度对矩形巷道电磁波传播特性影响的仿真[J]. 计算机仿真, 2016,33(2):216-220. (ZHANG Bingli,CHENG Lingfei,GAO Hui,et al. Simulation of influence of wall roughness on electromagnetic wave propagation characteristics in rectangular tunnel[J]. Computer Simulation, 2016,33(2):216-220.)
- [12] 姚善化,吴先良,张量. 矿井巷道壁粗糙度对电磁波传播损耗的影响[J]. 合肥工业大学学报, 2010,33(11):1725-1727. (YAO Shanhua,WU Xianliang,ZHANG Liang. Influence of rough wall on electromagnetic waves propagation attenuation in mine tunnels[J]. Journal of Hefei University of Technology, 2010,33(11):1725-1727.)
- [13] HAMMERSTAD E O,BEKKADAL F. Microstrip handbook[R]. Norway:University of Trondheim, 1975:98-110.
- [14] 赵缙,董富强. 膛线沟槽对小口径弹体流场的影响分析[J]. 弹箭与制导学报, 2015,35(2):132-133. (ZHAO Lei,DONG Fuqiang. Analysis about rifling grooves of small-caliber ammunition on the flow field[J]. Journal of Projectiles,Rockets, Missiles and Guidance, 2015,35(2):132-133.)
- [15] 夏文鹤,官文婷,孟英峰,等. 钻柱内孔变径结构条件下微波传播衰减规律研究[J]. 微波学报, 2018,34(5):91-96. (XIA Wenhe,GUAN Wenting,MENG Yingfeng,et al. Analysis of the attenuation law of microwave propagation with the drill string bore variable diameter structure[J]. Journal of Microwave, 2018,34(5):91-96.)