

水基附着介质罩对毫米波衰减的理论分析与实验研究

杜 瑞,樊养余,王剑书

(西北工业大学电子信息学院,陕西西安 710072)

摘 要: 本文主要研究多种可能出现的天线罩水基附着介质对毫米波所产生的衰减. 本文采用一个四层介质模型来模拟水附着在天线罩上的情况,根据 Fresnel 方程得到 150 GHz 和 298 GHz 电磁波衰减模型,通过测量纯水对毫米波所产生的衰减验证模型的正确性;再测量雨水、海水所产生的衰减,分析常见水基附着介质对毫米波所产生的衰减;最后测量不同盐度的海水对毫米波所产生的衰减,分析了海水盐度对衰减的影响. 实验结果证明毫米波的衰减随着天线罩上附着水层厚度的增加呈现出较为规律性增长,而此衰减受水中溶解物(微小颗粒和盐度)的影响较小. 本文对毫米波雷达在雨天等复杂室外条件下的应用具有一定的指导作用.

关键词: 毫米波; 水基介质; 衰减模型

中图分类号: TN956

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2017)09-2143-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2017.09.013

Theoretical Analysis and Experimental Study of Attenuation at Millimeter Wave Frequency by Water-Based Medium Radome

DU Rui, FAN Yang-yu, WANG Jian-shu

(School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China)

Abstract: The attenuation at millimeter wave frequencies due to water contamination within a radar system is investigated in this paper. A model consisting of four layers of a potential contaminant is adopted in order to simulate the scattering behavior when water deposits are present with a radome. An attenuation parameter based on the Fresnel principle is proposed at 150GHz and 298GHz, which is supported by measurements that are obtained from pure water experiments. The attenuation due to realistic water-based contaminants in a typical outdoor environment, such as rain water, is measured and analyzed; furthermore, attenuations through sea water with different salinity is measured and analyzed. The experimental results show that the attenuation produced by radome water deposits increases with water thickness and this attenuation is not heavily dependent on the particles, such as dirt and salt, within the water-based liquid. The results presented are important in determining the feasibility of millimeter wave radar devices in realistic outdoor environments.

Key words: millimeter wave; water-based medium; attenuation function

1 引言

毫米波雷达指工作频率在 30 GHz ~ 300 GHz 的雷达(对应波长 10mm ~ 1mm),相较于现在广泛使用的频率较低的微波雷达^[1,2],毫米波雷达工作频率高,可以较大工作带宽提供较高的成像分辨率,这一频段内的目标回波信号包含目标丰富的细节信息,有助于对目标进行探测识别^[3]. 但是,随着电磁波频率的升高,

电磁波的衰减会逐步增强. 为了更好的论证低毫米波雷达在室外不可控自然环境下的应用前景,有关此频段电磁波在实际情况下的衰减需要进行充分研究. 但迄今为止,有关此方面的论文和研究工作较少. 在此背景下,毫米波衰减效应的研究对毫米波雷达的未来应用前景具有重要意义.

实际情况中,毫米波雷达的衰减主要包括两部分:即雷达天线罩上附着物对毫米波产生的衰减和晴朗、

雨、雪、沙尘等天气情况在毫米波传播过程中对其所产生的大气衰减. Appleby 等^[4]的研究成果显示在清洁大气环境下,毫米波在大气窗口内的衰减小于 10 dB/km. 以车载毫米波雷达为例,其最大作用范围为 200m,考虑其作用距离,清洁大气情况下的大气衰减并不会很大程度上的影响毫米波雷达的表现. 所以,现阶段本文的主要工作集中在研究天线罩上附着物对于毫米波产生的衰减效应.

天线罩上附着物对毫米波产生的衰减主要包括附着物厚度,电磁波频率和天线罩材料等因素^[5-7]. 水基介质是日常生活中常见的雷达天线罩附着介质之一,容易以各种形式附着在天线罩上(如下雨). Tharek 等^[8]的测试结果显示,对于 26GHz 电磁波,有雨水附着的天线罩相比干燥的天线罩会额外产生 8dB 的衰减. Arage 等^[9]对 76.5GHz 电磁波在天线罩附着水情况下的衰减效应进行了研究,提出了衰减模型并进行了实验测量. 上述这些有关电磁波衰减的研究都集中在 100GHz 以下. Norouziyan 等^[10]对于毫米频段电磁波的衰减进行了简单定性测量,并没有提出衰减模型并进行针对性的测量验证.

本文将主要研究纯水、雨水和海水等实际中可能出现的附着介质对于毫米波(150GHz 和 298GHz 电磁波)的衰减. 这两个频率都位于文献^[4]中所述的大气传播窗口之中,具有较好的工程研究价值.

本文采用采用一个典型的四层介质模型^[11](空气,样本架,样本,空气)模拟实际情况中电磁波穿过天线罩和附着介质探测目标的过程. 简化之后再结合 Fresnel 反射透射公式^[12]得出衰减模型. 为了验证模型的正确性,首先测量纯水对毫米波的衰减,之后再分别对雨水和不同盐度的海水等常见天线罩附着介质对毫米波的衰减分别进行测量,对比纯水所产生的衰减,探讨毫米波雷达在各种复杂天气条件下的应用前景.

2 多层介质模型和衰减模型

2.1 多层介质模型

天线罩被污染物附着的情况可以简化为一个四层介质模型,由内自外依次为空气、样本架、样本、空气. 假设模型中所有介质同向均匀,平面电磁波垂直入射到多层结构,如图 1 所示.

为了模拟无反射介质,样品架选用对毫米波衰减较小的材料制成,其光学厚度为 298GHz 电磁波在样本架介质中传播半波长的整数倍,则上述模型简化为一个三层模型:空气、样本、空气. 平面电磁波垂直入射多层模型,穿过无反射的样本架,入射到样本,发生反射和透射. 本文主要研究附着样本厚度增加时,反射和透射能量的衰减.

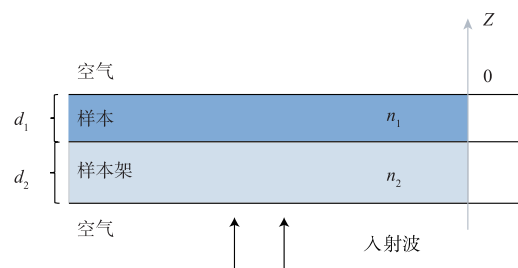


图1 多层介质模型

2.2 衰减模型

实际应用中采用的线性极化电磁波可以分为水平分量和垂直分量,根据 Fresnel 反射透射公式,简化之后的反射衰减 R 用式(1)进行计算:

$$R = R_h \cos^2 \psi + R_v \sin^2 \psi \quad (1)$$

其中 R_h 和 R_v 分别为反射衰减的水平分量和垂直分量.

$$R_v = |r_v|^2 = \frac{\left(\frac{\Omega}{n} - \frac{n}{\Omega}\right)^2}{(2 \cot \delta)^2 + \left(\frac{\Omega}{n} - \frac{n}{\Omega}\right)^2} \quad (2)$$

$$R_h = |r_h|^2 = \frac{\left(\frac{1}{\Omega n} - \Omega n\right)^2}{(2 \cot \delta)^2 + \left(\frac{1}{\Omega n} + \Omega n\right)^2} \quad (3)$$

透射衰减 T 可以通过下式进行计算:

$$T = T_h \cos^2 \psi + T_v \sin^2 \psi \quad (4)$$

其中 T_h 和 T_v 分别为透射衰减的水平分量和垂直分量:

$$T_v = |t_v|^2 = \frac{1}{\cos^2 \delta + \left(\frac{1}{2} \left(\frac{n}{\Omega} + \frac{\Omega}{n}\right) \sin \delta\right)^2} \quad (5)$$

$$T_h = |t_h|^2 = \frac{1}{\cos^2 \delta + \left(\frac{1}{2} \left(\Omega n + \frac{1}{\Omega n}\right) \sin \delta\right)^2} \quad (6)$$

上式中 Ω 为入射角和折射角的比, α 为入射角度, λ 为电磁波在介质中的传播波长, d 为附着样本的厚度, n 为样本的复折射系数, δ 为相位项, ψ 为电磁波极化角度.

$$\Omega = \frac{\cos \alpha}{\sqrt{1 - \left(\frac{\sin \alpha}{n}\right)^2}} \quad (7)$$

$$\delta = \frac{2\pi d}{\lambda} \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} \quad (8)$$

$$n = \sqrt{\epsilon_r} \quad (9)$$

ϵ_r 为相对介电常数,定义为介质介电常数与真空介电常数的比值.

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'' = \epsilon_0 \epsilon_r \quad (10)$$

$$\epsilon_r = \epsilon'_r - j\epsilon''_r$$

介电常数的虚部是由于材料内部的各种转向极化跟不上外高频电场变化而引起各种弛豫极化所致,代

表着材料的损耗项。

在毫米波频率段内,色散介质可以由慢驰豫过程和一个快驰豫过程组成的 Debye 模型描述,其复介电常数随频率的变化过程可以由下式描述^[13]:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_2}{1 + j\omega\tau_1} + \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_{\infty}}{1 + j\omega\tau_2} \quad (11)$$

其中 ε_s 为静态介电常数, ε_{∞} 为极限高频介电常数, ε_2 为驰豫过程中的过渡介电常数, τ_1 和 τ_2 分别为快慢驰豫时间常数。

3 测量系统描述

3.1 毫米波雷达相关参数

分别采用 ELVA-1 公司生产的扫描频率为 144GHz ~ 150GHz 的频率调制连续波雷达 (Frequency Modulated Continuous Wave Radar, FMCWR) 和 VivaTech SARL 公司生产的扫描频率为 282GHz ~ 298GHz 的频率步进雷达 (Stepped Frequency Radar, SFR). SFR 测量系统由矢量网络分析仪 (Vector Network Analyzer, VNA) 和上/下变频器组成. 上变频器输入为信号频率 2GHz ~ 18GHz, 下变频器输入信号频率为 282GHz ~ 298GHz. 测量过程中两个雷达都以单站形式工作, 采用标准增益喇叭天线, 天线的 3dB 方位波束宽度和仰角都为 10°.

两个雷达的详细参数总结如表 1.

表 1 FMCWR 和 SFR 参数

	FMCWR	SFR
工作频率	144GHz ~ 150GHz	282GHz ~ 298GHz
扫描带宽	6GHz	16GHz
天线波束方位角	10° (-3dB)	10° (-3dB)
天线波束俯仰角	10° (-3dB)	10° (-3dB)

3.2 测试系统描述

本文采用如图 2 所示的测试系统, 分别测试多种水基样本 (纯水、雨水和不同盐度的海水) 对 150GHz 和 298GHz 电磁波的衰减。

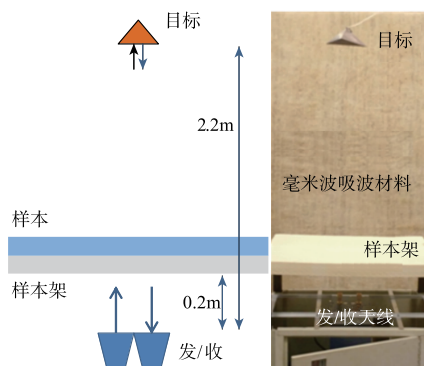


图2 实验测量系统

图 2 左为测量系统示例, 图 2 右为实际测量系统, 附着样本将置于样本架上, 模拟天线罩上的附着物, 电磁波经过发射端透过附着样本对目标进行探测. 为了减小测量过程中的背景噪声和多径干扰, 整个测量实验在毫米波消声室内完成, 温度维持在 24°C. 发/收端距离样本架的距离满足远场条件, 电磁波以平面波形式垂直入射到多层介质. 发/收端距离样本架下边界和目标分别为 0.2m、2.2m.

4 实验测试及分析

4.1 纯水对于毫米波的衰减测量

采用第 2 节所描述的测量系统对毫米波衰减进行测量, 分别使用 FMCWR 和 SFR 进行测量实验. 使用 FMCWR 对 150GHz 电磁波衰减进行测量时, 将样本架上均匀分布的水层厚度从 0.1mm 逐渐增加到 0.6mm, 直至回波信号中目标位置没有明显的峰; 使用 SFR 对 298GHz 电磁波进行测量时, 将样本架上均匀分布的水层厚度从 0.1mm 逐渐增加到 0.45mm, 同样直至回波信号中目标峰值淹没于背景.

为了精准控制水层厚度的增加, 本文采用文献[9]中的方法: 将水按照定量体积 (等于测试水层厚度 × 测试范围面积) 滴撒到吸附性好的纸巾 (纸巾面积等于测试范围面积) 上, 利用纸巾和水的内部张力将水控制在实验测量范围之内, 从而形成厚度均匀的附着水层. 由于纸巾的吸附能力有限, 为了防止纸巾过饱而导致测量介质扩散到测量范围之外, 实验中会根据水层厚度增加纸巾厚度. 为了减小测量中的误差, 本节所有的测量结果都是取 10 次测量的平均值.

本文实验中入射角 $\alpha = 0^\circ$, 第 2 节中模型的其他参数取值如表 2 所示.

表 2 参数选择

	空气	水
电导率 σ	5×10^{-15}	10^{-4}
介电常数 ε	1.0005	ε

通过计算可以得到纯水在 150GHz 和 298GHz 频率时的复介电常数:

$$\varepsilon_{PW}(150) = 7 - j10 \quad (12)$$

$$\varepsilon_{PW}(300) = 4.8 - j4.5 \quad (13)$$

将式(12)的值带入衰减模型可以计算得到测量频率为 150GHz 时, 附着水层厚度从 0.1mm 增加到 0.6mm 时电磁波的反射衰减和透射衰减, 如图 3 所示.

图 3 中实线为仿真模型衰减曲线, 虚线为实测数据. 可以看出仿真模型和实测数据之间的误差较小 (反射衰减绝对误差小于 2dB, 透射衰减绝对误差小于 3dB), 具有较好的一致性, 这充分说明了模型的有

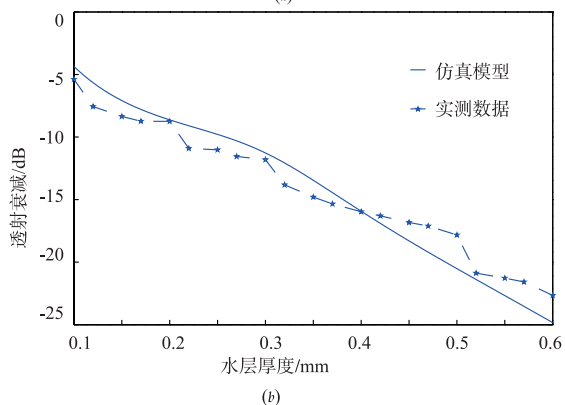
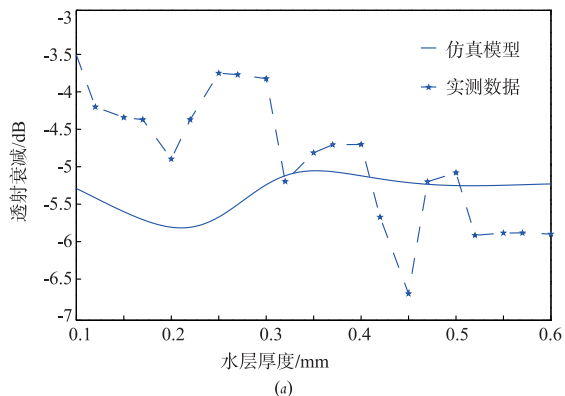


图3 150GHz电磁波经过不同厚度水层的衰减

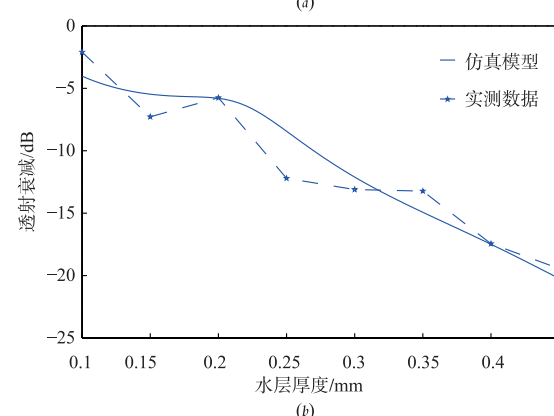
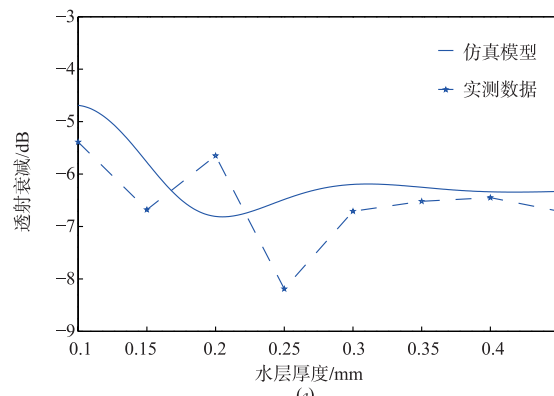


图4 298GHz电磁波经过不同厚度水层的衰减

效性.

将式(13)代入衰减模型可以计算得到测量频率为298GHz时,附着水层厚度从0.1mm增加到0.45mm时电磁波的反射衰减和透射衰减,如图4.

图4中实线为仿真模型衰减曲线,虚线为实测数据.可以看出仿真模型和实测数据之间误差叫较小(反射衰减绝对误差小于2dB,透射衰减绝对误差小于3.5dB),这充分说明了模型的有效性.综合对比可以发现,水对298GHz电磁波所产生的反射衰减、透射衰减大于其对150GHz电磁波所产生的衰减.

4.2 水基介质对于毫米波的透射衰减测量

透射衰减在实际应用中直接影响雷达对目标的探测,之后的实验主要测量透射衰减.考虑到实际情况中可能出现在天线罩上的附着水,分别使用实际采集的雨水和海水作为附着介质对毫米波的衰减进行测量.与纯水的测量一样,使用FMCWR对150GHz电磁波的衰减进行测量,附着的水层厚度从0.1mm增加到0.6mm;使用SFR对298GHz电磁波的衰减进行测量,附着的水层厚度从0.1mm增加到0.45mm.

图5(a)为纯水、雨水和海水对150GHz电磁波所产生的衰减的测量结果,图5(b)为这三种附着水对298GHz电磁波所产生的衰减的测量结果.通过对比可以发现,三种可能出现在实际情况中的附着水对于的

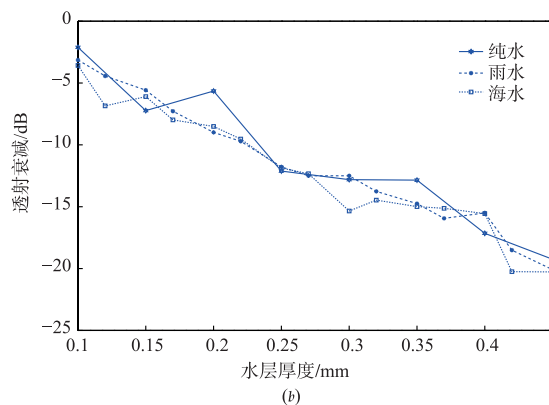
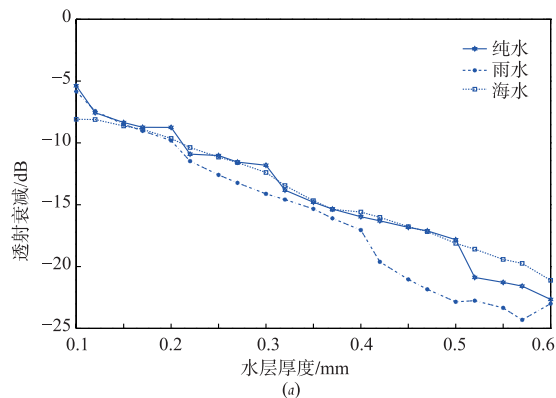


图5 多种附着水层对于毫米波的衰减

150GHz 和 298GHz 的电磁波所产生的衰减幅度基本相同(偏差分别小于 5dB 和 3.5dB),这充分说明了毫米波雷达在各种水基介质附着情况下仍可保持与纯水附着情况下相似的探测性能。

4.3 不同盐度海水对于毫米波的衰减测量

地球上海水的盐度主要介于 3.1% ~ 3.8% 之间,为了测试不同盐度的海水对于毫米波的衰减,在这个盐度范围内分别选取盐度为 3.1%、3.5% 和 3.8% 盐度的海水作为附着介质对毫米波的衰减进行测量。

图 6(a) 为盐度分别为 3.1%、3.5% 和 3.8% 的海水对 150GHz 电磁波衰减的测量结果,图 6(b) 为三种不同盐度海水对 298GHz 电磁波衰减的测量结果。通过对比可以发现,三种不同盐度的海水对 150GHz 和 298GHz 电磁波所产的衰减基本相同(偏差分别小于 4.5dB 和 4dB),这说明了毫米波衰减并不会因为附着海水盐度的改变而产生较大变化。

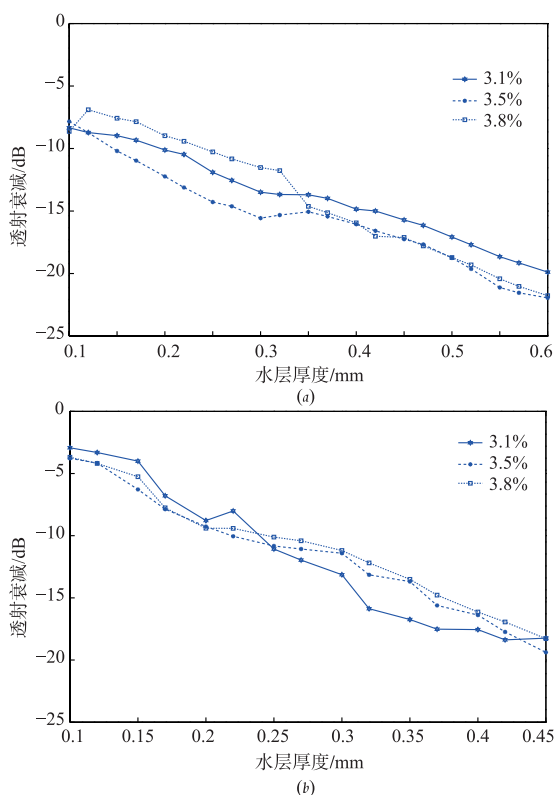


图6 多种浓度附着水层对毫米波的衰减

5 结论

本文研究了附着在天线罩上的介质对毫米波的衰减规律,得出了一个简化的平面电磁波入射多层介质的衰减模型——Fresnel 衰减模型。通过实验测试,验证了模型的有效性。首先对纯水进行测量,验证了模型的正确性。之后对现实中可能出现的天线罩附着介质:雨水、海水对于毫米波的衰减进行了测量。总结发现随着

附着介质厚度的增加,其对于毫米波的衰减呈现出较有规律的增长,但水基附着物溶解物的对于毫米波的衰减影响较小。实验结果证明了毫米波雷达在雨天等复杂天气条件下的室外应用前景。

参考文献

- [1] 邓彬,吴称光,秦玉亮,等.合成孔径雷达微动目标指示(SAR/MMTI)研究进展[J].电子学报,2013,41(12):2436-2442.
DENG Bin, WU Cheng-guang, QIN Yu-liang. Advances in synthetic aperture radar micro-motion target indication (SAR/MMTI) [J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(12):2436-2442. (in Chinese)
- [2] 何子述,韩春林,刘波. MIMO 雷达概念及其技术特点分析[J].电子学报,2005,33(s1):2441-2445.
HE Zi-shu, HAN Chun-lin, LIU Bo. MIMO radar and its technical characteristic analyses [J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(s1):2441-2445. (in Chinese)
- [3] Stove A. Potential applications for low-Tera-Hertz radar [A]. Radar Symposium, 2015 [C]. Dresden, Germany: IEEE, 2015. 191-196.
- [4] Appleby R, Anderton R N. Millimeter-wave and submillimeter-wave imaging for security and surveillance [J]. Proceedings of the IEEE, 2007, 95(8):1683-1690.
- [5] Cheah J Y C. Wet antenna effect on VSAT rain margin [J]. IEEE Transactions on Communications, 1993, 41(8):1238-1244.
- [6] Mandeep J S. Analysis effect of water on a Ka-band antenna [J]. Progress in Electromagnetics Research Letters, 2009, 9:49-57.
- [7] Rahim S K, Abdulrahman A Y, Rahman T A, et al. Measurement of wet antenna losses on 26 GHz terrestrial microwave link in malaysia [J]. Wireless Personal Communications, 2012, 64(2):225-231.
- [8] Tharek A R, Din J, Kamal S, Rahim A. Preliminary analysis of rain attenuation measurement on two 26 GHz links in Malaysia [A]. International Wireless and Telecommunication Symposium, 2000 [C]. Shah Alam, Malaysia: IEEE, 2000. 25-29.
- [9] Arage A, Kuehnle G, Jakoby R. Measurement of wet antenna effects on millimetre wave propagation [A]. IEEE Conference on Radar, 2006 [C]. New York, USA: IEEE, 2006. 190-194.
- [10] Norouziyan F, Qi F, Willetts B, et al. Characterisation of attenuation at low THz frequencies in radar sensors [A]. European Radar Conference (EuRAD), 2015 [C]. Paris, France: IEEE, 2015. 101-104.
- [11] Bergstrand E, Maréchal A, et al. Grundlagen der Optik / Fundamentals of Optics [M]. Berlin Heidelberg: Springer

Press, 1956.

- [12] Born M, Wolf E. Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light[M]. Cambridge: Cambridge Press, 1999.
- [13] Koeberg M, Wu C C, Kim D, et al. THz dielectric relaxation of ionic liquid: water mixtures[J]. Chemical Physics Letters, 2007, 439(1): 60-64.

作者简介



杜 瑞 男, 1988 年 8 月出生, 陕西咸阳人, 西北工业大学在读博士生. 从事毫米波雷达, 阵列信号处理, 模式识别方向的研究.
E-mail: rdu@mail.nwpu.edu.cn



樊养余 男, 1960 年 4 月出生, 陕西蓝田人, 西北工业大学电子信息学院, 博士生导师. 主要研究方向: 数字图像处理理论与应用, 虚拟现实技术, 数字信号处理理论与应用, 无线光通信技术, 虚拟人技术, 人工智能, 目标检测与识别, 信息隐藏, 噪声中信号检测与估计等.
E-mail: fan_yangyu@nwpu.edu.cn



王剑书 男, 1989 年 6 月出生, 四川南充人, 西北工业大学在读博士生. 从事阵列信号处理, 模式识别方向的研究.
E-mail: 565563085@163.com