

基于太赫兹透射谱的土壤含水量测量

夏佳欣 范成发 王可嘉 刘劲松

(华中科技大学武汉光电国家实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要 液体水是一种极性液体,对太赫兹波有很强的吸收。土壤含水量的细微变化,会影响透射太赫兹波的特性。建立了一种基于时域太赫兹透射谱的土壤含水量测量方法。提出了土壤太赫兹参数的概念,给出了土壤含水量的计算公式。利用太赫兹时域频谱系统,对土壤样品进行了大量的测量,初步给出了土壤太赫兹参数的数值。通过对比该方法与称重法得到的含水量,表明其准确可行。

关键词 太赫兹光子学; 土壤含水量; 时域光谱; 透射谱

中图分类号 TN247

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP48.023001

Soil Moisture Measurement Based on Terahertz Transmission Spectrum

Xia Jiaxin Fan Chengfa Wang Kejia Liu Jinsong

(Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract Liquid water is a kind of polar liquid, and has a strong absorption on the terahertz wave. The tiny change of soil moisture has a great influence on the transmitted terahertz wave. Accordingly, a method is proposed to measure the soil moisture based on time domain terahertz transmission spectrum. Soil terahertz parameters concept is proposed and the equations to calculate soil moisture are derived. Abundant results of soil samples are obtained with terahertz time domain spectroscopy, and the preliminary soil terahertz parameter value is given. By comparison with oven drying method, it demonstrates that this method is accurate and available.

Key words terahertz photonics; soil moisture; time domain spectroscopy; transmission spectrum

OCIS codes 300.6495; 300.1030; 120.4290; 120.4530; 120.4640

1 引言

土壤的含水量是一个非常重要的物理参数,它对于工程建设、农业生产、防洪抗汛、环境保护等都具有重要意义。例如,在筑路工作中,对土壤的含水量要求相当严格,如果土体的含水量过高会使土体无法压实^[1],导致土体强度降低,对工程质量影响十分严重。建筑过程中合适的土体含水量能稳定路基,增强路面强度。太赫兹波是指频率为 0.1~10 THz 波段的电磁波。太赫兹波对很多介电材料和非极性液体具有很好的穿透性,包括纸张、陶瓷等可见光无法穿透的物质。另外太赫兹波辐射光子能量较低,不会对人体产生任何危害。利用 THz 辐射测量物质含水量的问题,早有人做过一定的尝试,包括树叶^[2,3]、纸张^[3,4]等,多为实验现象的描述,没有建立有效的算法和模型。太赫兹脉冲经过土壤样品后会受土壤含水量的影响而产生不同的时延和衰减,由此,本文通过定量实验建立了一种新型的土壤含水量测量方法。

2 实验原理

土壤是由空气、固体和水组成的多孔介质,成分复杂,且随空间区域而变化。已有多种测量土壤含水量的方法,如烘干称重法、射线法(中子法)^[5~7]、时域反射(TDR)法^[8]、频域反射(FDR)法^[9,10]、电阻法^[11]、张力计法^[7]、湿度计法^[7,8]等,但都有一些不可克服的缺点。

收稿日期: 2010-10-13; **收到修改稿日期:** 2010-10-25

基金项目: 国家自然科学基金(10974063)和武汉光电国家实验室创新基金(P080008)资助课题。

作者简介: 夏佳欣(1985—),男,硕士研究生,主要从事太赫兹光电子学方面的研究。E-mail: xiajiaxin@126.com

导师简介: 刘劲松(1959—),男,教授,博士生导师,主要从事太赫兹光电子学、非线性光学等方面的研究。

E-mail: jsliu4508@vip.sina.com (通信联系人)

太赫兹时域频谱系统 (THz-TDS) 是当前一种比较成熟的太赫兹产生和探测系统, 典型装置如图 1 所示。飞秒激光脉冲经过分束镜后分为抽运光和探测光。抽运光激励发射器 (如光电导天线), 产生太赫兹脉冲辐射, 并入射到探测器上, 改变了探测器的某些特性, 由探测光将这种变化读出, 通过测量探测器输出电压, 就能间接测量到太赫兹波。改变抽运光路上的延迟线, 就能将太赫兹波的时域波形测量出来。如果在发射器和探测器中间放置一个样品, 就能测量出样品的时域太赫兹透射谱。将时域谱进行傅里叶变换, 可以得到相应的频域谱^[12]。

图 2 中的黑色曲线, 是 THz-TDS 系统所产生的太赫兹波脉冲的时域波形, 介质是空气, 通常将其作为参考波形。放置一定含水量的土壤样品后测得的波形为灰色曲线, 称其为样品波形。二者相比较, 发现有两个物理量发生明显的变化: 一个是峰值幅度, 一个是峰值出现的时刻。样品吸收太赫兹波, 导致样品波形的峰值幅度远小于参考波形。样品的介电常数比空气的大, 导致峰值位置的延迟。

我们通过大量的实验发现, 峰值幅度随含水量指数减小, 峰值延迟随含水量线性增加。分别以峰值幅度和延迟为因变量, 样品含水量为自变量, 用实验数据对这两个规律进行了曲线拟合, 得到两条拟合曲线, 发现每条曲线有两个参量。这 4 个参量仅同土壤的特性有关, 称其为土壤的太赫兹参数。以这两个物理规律为基础, 建立一种测量土壤含水量的方法, 称为太赫兹法。

3 实 验

3.1 实验装置与样品制备

实验装置是立陶宛 Ekspla 公司的 THz-TDS 系统, 工作带宽 0.2~3 THz, THz 脉冲的电压峰值 0.13 V, 脉宽 1.0 ps。利用美国 Coherent Asia 公司 Micra-5 型飞秒激光器作为抽运源, 重复频率 76~82 MHz, 输出功率在 800 nm 时大于 400 mW, 脉宽小于 100 fs。实验室温度为 25 °C, 湿度为 40%。

利用高精度注塑成型的聚苯乙烯夹具 (内壁长 6.0 cm, 宽 5.0 cm, 各壁厚 1.6 mm, 夹层厚度 1.5 mm), 将土壤制备成实验样品。首先取空夹具, 称量其质量为 m_1 , 向其中添加足量干燥土壤并压实, 再测量样品的质量为 m_2 , 向样品中注入足量蒸馏水, 待其扩散均匀后测得其质量为 m_3 , 此时样品的含水量为

$$x = \frac{m_3 - m_2}{m_3 - m_1} \times 100\%, \quad (1)$$

称量使用的分析天平型号为 FA1104B, 感量为 0.1 mg。利用 TDS 装置测得时域波形后, 样品经过一段时间的放置或者通风热烘 (50 °C), 重新测量样品质量 m'_3 , 可计算出新的含水量值, 测量新含水量下的透射时域波形。如此反复, 最终获得样品从含水量饱和直至完全干燥的太赫兹时域波形及称重法含水量。

3.2 实验结果

通过时域波形可以读取样本引发的延迟量 T 和衰减 F , 所谓延迟就是参考波形和样品波形相同特征点的时间差值, 实验中取正负峰值间 0 点为特征点; 衰减为样品波形峰值和参考波形峰值的比, 峰值取波形的正向最大值。用湖北的黄土制备了 001~003 号样品, 图 3 是 001 号样品的测量结果。可以看出, 延迟随含水量线性增加, 衰减随含水量指数衰减。对实验数据分别进行了多项式拟合和指数拟合, 如图 3(c) 和 (d) 中的红线所示。

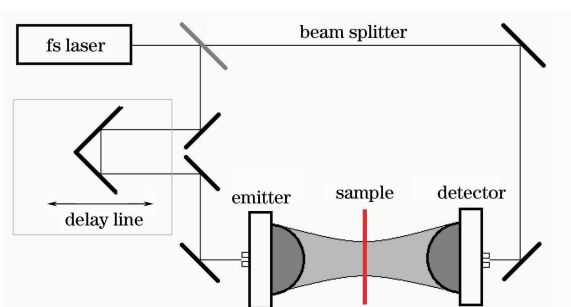


图 1 典型透射式太赫兹时域光谱装置
Fig. 1 Typical transmitted terahertz time domain spectroscopy

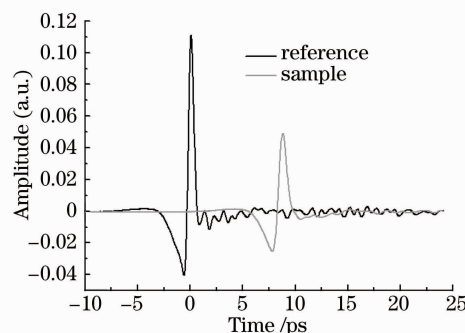


图 2 时域参考波形和时域样品波形
Fig. 2 Reference wave and sample wave in time domain

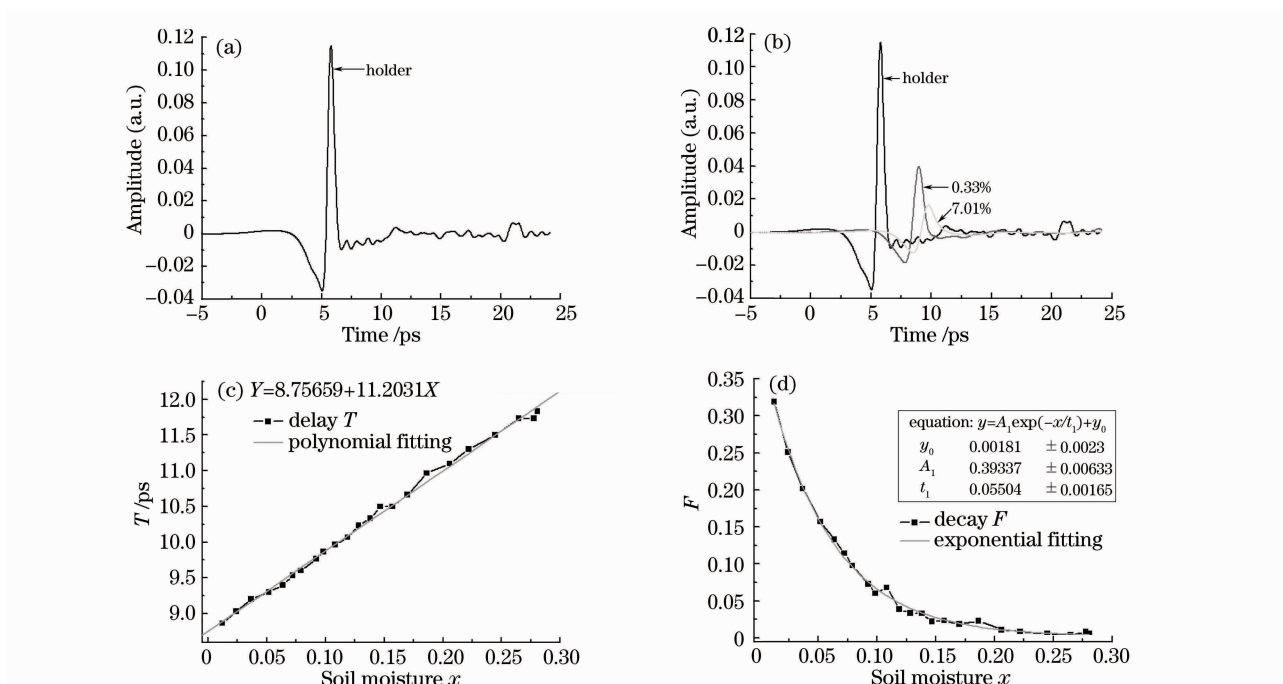


图3 黄土样品的实验曲线。(a)空夹具盒的太赫兹透射时域波形,(b)两种含水量的样品太赫兹透射时域波形,(c)峰值处的时域延迟与样品含水量的关系曲线,(d)峰值幅值与样品含水量的关系曲线

Fig. 3 Experimental curves of the yellow soil. (a) time domain waveform of the holder, (b) time domain waveform of two samples with different soil moistures, (c) waveform delay with moisture relation curve, (d) waveform decay with moisture relation curve

4 模型建立

延迟-含水量的拟合关系式为 $T=A_1x+B_1$, 其中系数 A_1 和 B_1 与土壤种类以及样品的压实度相关。所谓土壤种类,是指土壤采集的地理区域。不同区域的土壤,有不同的性质。用同一种类的土壤制备的样品,如果压实度相同,则参数 A_1 和 B_1 相同。假设夹具盒内部体积和夹层厚度是刚性不变的,则装入的土壤质量越大,样品的压实度越高。实验用夹具盒是用聚苯乙烯注塑成型而得到的,具有相当好的刚性。由于不同的样品中装入的土壤质量有一定的差别,导致相同种类的土壤制备成的不同样品,具有不同的压实度。样品太赫兹透射谱的延迟量 T ,与样品的光学厚度 d 成正比,而 d 与土壤密度,即压实度相关。简单起见,假设光学厚度 $d \propto$ 压实度 \propto 土壤质量,这样,可将延迟量 T 与含水量 x 的变化关系表示成

$$T = A_1x + B_1 = (a_1x + b_1)d, \quad (2)$$

(2) 式的意义是,相同种类的土壤,具有相同的参数 a_1 和 b_1 。用相同种类的土壤制备成的不同样品,由于质量不同,导致光学厚度 d 不同,具有不同的 A_1 和 B_1 ,同时 A_1 和 B_1 正比于光学厚度 d 。值得注意的是,对于一个给定的样品,其参数 A_1 和 B_1 可以通过实验测得。对于一种给定的土壤,其参数 a_1 和 b_1 要通过对不同样品的实验测试,通过计算得到,具体方法后述。

衰减-含水量的拟合关系式为 $\ln F = A_2x + B_2$, 其中系数 A_2 和 B_2 是两个常数,与土壤种类以及样品的压实度相关。同样假设 A_2 和 B_2 与样品的光学厚度 d 呈简单的线性关系,则有

$$\ln F = A_2x + B_2 = (a_2x + b_2)d, \quad (3)$$

式中的参数 a_2 和 b_2 , 只与土壤种类有关,与光学厚度 d 无关。对于给定的土壤,(2) 式和(3) 式中的 4 个参数 a_1, a_2, b_1, b_2 是确定的,称其为土壤的太赫兹参数。

用取自吉林省长岭县的土壤(属于典型的东北地区黑土),制备了 3 个样品 004~006。图 4 给出了 004 号样品的测量结果,表明延迟和衰减随含水量的变化规律,依然可以用(2)式和(3)式加以描述。

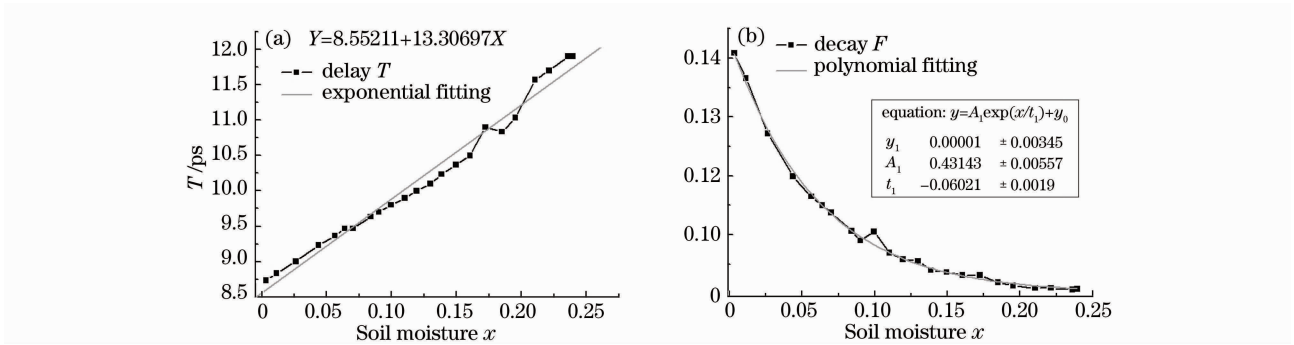


图4 黑土样品的实验测试结果。(a)峰值处的时域延迟与样品含水量的关系曲线,(b)峰值幅值与样品含水量的关系曲线

Fig.4 Experimental curve of the black soil. (a) waveform delay with moisture relation curve, (b) waveform decay with moisture relation curve

5 结果分析

5.1 土壤太赫兹参数的确定

分别对 001~003 号黄土样品和 004~006 号黑土样品进行了实验测量,并基于(2)式和(3)式,对实验数据进行了拟合。表 1 列出了各个样品的拟合参数 A_1, B_1, A_2 和 B_2 以及在制备样品时用分析天平称量的干土质量 m 。基于前面的假设:光学厚度 $d \propto$ 压实度 \propto 土壤质量,同时注意到可以从(2)式和(3)式消去参量 d ,所以无需知道 d 的绝对值,而只需知道 d 的相对值。故此,设质量最小的 001 号样品的 $d=1$,其余样品的 d 值等于该样品的质量与 001 样品质量的比。以此原则得到的各个样品的 d 的取值,见表 1。对于每个样品,根据其 A_1, B_1, A_2, B_2 以及 d 的数据,可以计算出 a_1, a_2, b_1, b_2 的相应取值,结果见表 2。

将数据按黄土和黑土分别处理,发现两种土壤的太赫兹参数略有不同。据此,目前假设所有种类的土壤具有相同的太赫兹参数,这样,可对 6 个样品的数据统一进行处理。经过适当的取舍及取平均值,得到土壤的太赫兹参数为: $\bar{a}_1=12.1939, \bar{b}_1=7.5186, \bar{a}_2=-16.4528, \bar{b}_2=-0.7118$ 。

表 1 各个样品的拟合曲线系数

Table 1 Fitted curve parameters of each sample

Sample ID	A_1	B_1	A_2	B_2	m	d
001	11.2031	8.7565	-17.8891	-1.1453	4.7271	1
002	12.7796	7.9546	-17.8891	-0.7497	5.0695	1.0724
003	14.4861	8.6415	-19.4909	-0.7720	5.5766	1.1797
004	13.3070	8.5521	-17.4604	-0.7726	5.1073	1.0804
005	13.5506	8.7564	-18.5335	-0.7108	5.2289	1.1062
006	15.5467	8.9550	-20.5997	-0.7030	6.0312	1.2759

表 2 各个样品的太赫兹参数

Table 2 Terahertz parameters of each sample

Sample ID	a_1	b_1	a_2	b_2	
Yellow soil	001	11.2031	8.7565	-17.8891	-1.1453
	002	11.9165	7.4174	-16.6808	-0.6991
	003	12.2794	7.3251	-16.5217	-0.6543
Black soil	004	12.3383	7.9154	-16.1606	-0.7151
	005	12.2502	7.9161	-16.7549	-0.6425
	006	12.1851	7.0187	-16.1455	-0.5510

从(2)式和(3)式中消去 d ,得到

$$x = \frac{b_1 \ln F - b_2 T}{a_2 T - a_1 \ln F} \quad (4)$$

利用(4)式,可以从实验中测得的延迟量 T 和相对峰值 F ,就能得到样品的土壤含水量 x 。

5.2 误差分析

利用称重法得出样品的含水量,记为 x_1 。将样品进行 TDS 测量,得到太赫兹透射谱的延迟量 T 和相对峰值 F ,利用(4)式,并采用上述太赫兹参数的值,得到样品的含水量,记为 x_2 。二者的绝对误差记为 $\Delta x = |x_1 - x_2|$ 。图 5 给出了 6 个样品的 Δx 随 x_1 的变化曲线。

由图 5 显示的结果可以看出,基本误差范围为 0~3%。在含水量较低范围内(0~10%)误差小于 1%,这是样品对 THz 波吸收较少,信噪比提高的结果。由于称重法是目前公认的土壤含水量最为精确的测量方法,以上结果表明,基于土壤太赫兹透射谱的含水量测量法,具有相当高的精度。根据文献[13],同样以称重法为标准,中子法和 TDR 法的实验测定误差分别在 0.22%~7.30%之间和 0.17%~7.01%之间。通过比较可以看出,本文提出的太赫兹法具有更小的误差。因此,通过不断的充实和完善,可望发展成一种实用的土壤含水量测量方法。

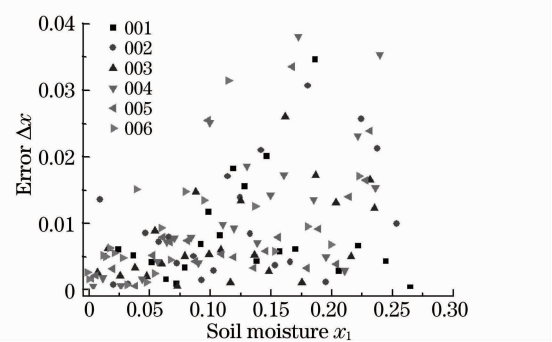


图 5 各个样品的测量误差分析

Fig. 5 Measurement error analysis of each sample

6 结 论

利用 TDS 系统可以快速准确地测得土壤的含水量,并且相对于其他方法具有更小的测量误差。相比烘干称重法,太赫兹法具有快速方便的优点,而且可以在现场实时操作;相比中子法,太赫兹法具有对人体完全无害、精度高等优点;相对于电阻法,张力计法,湿度计法,太赫兹法具有更高的精度,更好的实时性;相对于同太赫兹法近似度较高的 TDR 法,因为太赫兹波相对于高频电磁波对水更加敏感,而且波长更短,因此太赫兹法具有更高的精度。

尚需开展大量的工作来进一步完善本文提出的方法。1) 还需采集更多种类的土壤,测量其太赫兹参数。2) 要考虑土壤的构成,而不是仅仅考虑地理区域的差别对太赫兹参数的影响。例如,即便在地理上相差不远的区域,土壤中沙子石头含量的不同,也会导致其太赫兹参数的不同。3) 建立起一种快速便捷的太赫兹参数测量方法,十分必要。以高速公路施工为例,在现场迅速测定当地土壤的太赫兹参数后,就能按照规范逐点逐段,开展快速测量。4) 开发便携式、小型化、高可靠、低成本的太赫兹频谱仪,应用于施工现场。目前市场上已有便携式的产品,但售价很高,限制了推广应用。

参 考 文 献

- 1 Feng Teli, Guang Zhihe, Zhang Shuguang. Fast road building method with high moisture soil discussing[J]. *Science & Technology Information*, 2007, (33): 121
冯特立, 光治河, 张曙光. 高含水量土快速筑路方法的探讨[J]. *科技信息(科学教研)*, 2007, (33): 121
- 2 Sillas Hadjiloucas, Lucas S. Karatzas, John W. Bowen. Measurements of leaf water content using terahertz radiation[J]. *IEEE Tmicrow Theory*, 1999, **47**(2): 142~149
- 3 H. Zhang, K. Mitobe, N. Yoshimura. Terahertz imaging for water content measruement [C]. Proc. International Symposium on Electrical Insulating, 2008. 87~90
- 4 D. Banerjee, W. Von Spiegel, M. D. Thomson *et al.*. Diagnosing water content in paper by terahertz radiation[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(12): 9060~9066
- 5 Chen Benhua. Signal collection and treatment process in detection of soil moisture by neutron[J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 1996, **16**(3): 206~209
陈本华. 中子探测土壤水分的信号采集处理过程[J]. *核电子学与探测技术*, 1996, **16**(3): 206~209
- 6 Peng Shiming, Lin Jiabin. Neutron moisture gauge field measurement accuracy analysis and comparison with drying method [J]. *Groundwater*, 2001, **23**(2): 67~68
彭士明, 林家斌. 中子土壤水分仪田间测量与烘干法精度分析比较[J]. *地下水*, 2001, **23**(2): 67~68
- 7 Yu Jinyuan, He Yan, Zhao Zhongfu *et al.*. Comparison and analysis of measuring methods for soil moisture of farmland[J].

- Zhejiang Hydrotechnics*, 2007, **154**(6): 1~2
- 郁进元, 何岩, 赵忠福等. 农田土壤水分各种测量方法的比较与分析[J]. *浙江水利科技*, 2007, **154**(6): 1~2
- 8 G. C. Topp, J. L. Davis, A. P. Annan. Electro-magnetic determination of soil water content using TDR: I. Application to wetting fronts and steep gradients[J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1982, **46**(4): 672~678
- 9 Chen Haibo, Ye Linmao, Fan Yulan *et al.*. Based on the principle of soil moisture FDR measuring technique[C]. China's Meteorological Society 2008 Annual Drought and Disaster Mitigation, Beijing: China's Meteorological Society, 2008. 165~168
- 陈海波, 冶林茂, 范玉兰等. 基于 FDR 原理的土壤水分测量技术[C]. 第六届干旱气候变化与减灾学术研讨会分会场论文集, 2008. 165~168
- 10 G. C. Topp, J. L. Davis, A. P. Annan. Electromagnetic determination of soil water content: Measurement in coaxial transmission lines[J]. *Water Resour. Res.*, 1980, **16**(3): 574~582
- 11 Chen Jiazhou, Chen Mingliang, He Yuanqiu. Each characteristic of contemporary soil moisture measurement techniques[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2001, (3): 25~28
- 陈家宙, 陈明亮, 何圆球. 各具特色的当代土壤水分测量技术[J]. *湖北农业科学*, 2001, (3): 25~28
- 12 X.-C. Zhang, J. Z. Xu. Introduction to THz Wave Photonics[M]. Berlin: Springer, 2010. 27~70
- 13 Wang Guiyan, Shi Xiupeng, Zhang Jianheng *et al.*. A study on the comparison of measuring soil water content with TDR, neutron probe and oven dry[J]. *J. Agricultural University of Hebei*, 2000, **23**(3): 23~26
- 王贵彦, 史秀捧, 张建恒等. TDR 法、中子法、重量法测定土壤含水量的比较研究[J]. *河北农业大学学报*, 2000, **23**(3): 23~26