第 21 卷　第 6 期　　太赫兹科学与电子信息学报　　Vol.21，No.6
2023 年 6 月　　Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology　　Jun.，2023

文章编号：2095-4980(2023)06-0759-08

太赫兹频段基于NR迭代法的复介电常数提取

贾　锐[1]，许　靖[2]，张振伟[*1,2]，黄　辉[3]，高小强[4]，刘　林[4]，缪寅宵[4]，张存林[1]，赵跃进[2]

(1.首都师范大学 物理系，北京 100048；2.北京理工大学 光电学院，北京 100081；
3.北京芯宸科技有限公司，北京 100029；4.北京航天计量测试技术研究所，北京 100076)

摘　要：伴随着6G通信的发展，雷达遥感、检测成像等多个领域向太赫兹频段拓展，获取材料在该频段的介电常数显得愈发重要。本文基于NR迭代法提取了太赫兹频率下样品的复介电常数，分析了迭代法的初值选取对提取结果的影响。在325~500 GHz频段(Y频段)搭建了一套由矢量网络分析仪(VNA)、扩频模块和四抛物面镜组成的8*f*准光系统，实现散射参数S_{21}的自由空间测量。由电磁波传输模型推导出复介电常数与S_{21}之间的关系式，利用迭代法提取出了特氟龙(Teflon)、丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物(ABS)和聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)样品的复介电常数谱，与其他文献报道的结果一致，验证了系统和方法的有效性。

关键词：复介电常数；矢量网络分析仪；迭代法；太赫兹；自由空间法

中图分类号：O438　　**文献标志码：**A　　**doi：**10.11805/TKYDA2022136

Extraction of complex permittivity in terahertz band based on NR iterative method

JIA Rui[1]，XU Jing[2]，ZHANG Zhenwei[*1,2]，HUANG Hui[3]，GAO Xiaoqiang[4]，LIU Lin[4]，MIAO Yinxiao[4]，ZHANG Cunlin[1]，ZHAO Yuejin[2]

(1.Department of Physics，Capital Normal University，Beijing 100048，China；
2.School of Optics and Photonics，Beijing Institute of Technology，Beijing 100081，China；
3.Beijing Xinchen Technology Co.，Ltd，Beijing 100029，China；
4.Beijing Aerospace Institute for Metrology and Measurement Technology，Beijing 100076，China)

Abstract：It is important to obtain the dielectric constant of materials in terahertz band for applications of 6G communication, radar remote sensing, detection and imaging. In this paper, the complex permittivity of samples is extracted based on the Newton Raphson(NR) iterative method, of which the influence of the initial value is analyzed. A set of 8*f* quasi optical system consisting of Vector Network Analyzer(VNA), spread spectrum module and four parabolic mirrors is built in 325~500 GHz(Y-band) to realize the free space measurement of scattering parameter S_{21}. The relationship between complex permittivity and S_{21} is derived from the electromagnetic wave transmission model. The complex permittivity spectra of Teflon, ABS and PMMA samples are extracted by iterative method. The results are consistent with other literatures, which verify the effectiveness of the proposed system and the method.

Keywords：complex permittivity；Vector Network Analyzer；iterative method；terahertz；free space method

通信、雷达、遥感成像、射电天文和检测成像等技术领域正快速向太赫兹波段拓展。在这些领域中，材料的介电常数是各种系统和器件设计应用的关键参数之一，起到至关重要的作用[1-4]。这需要对太赫兹波段材料的电磁特性有全面的认识，因此测量材料在太赫兹波段的复介电常数是一个至关重要的研究方向[5-6]。

在较低频段，基于波导、同轴探头、谐振腔[7-10]的测量方法能够获得很好的效果。但随着频率的不断提高，

收稿日期：2022-07-07；**修回日期：**2022-08-30

基金项目：国家自然科学基金委航天制造联合基金资助项目(U1837202)；国家自然科学基金重点资助项目(61935001)；国家重点研发计划资助项目(2020YFB2009303)

[*]**通信作者：**张振伟　email: zhangzw@cnu.edu.cn

尤其是达到太赫兹频段后，上述方法产生许多困难，如样品制备、尺寸的匹配精确度等。这种情况下，基于准光系统的测量方法可以有效地进行材料参数表征。相比另一类基于太赫兹时域光谱的准光学参数测量方法，矢网的频率分辨力更高，因此基于矢网的准光系统逐渐成为了研究热点。2015 年，Tosaka 在 220~330 GHz 利用双透镜系统进行复介电常数的测量[11]。2017 年，Turgut 在 325~500 GHz 利用双反射镜系统进行复介电常数测量[12]。常用的参数提取方法为 Nicolson–Ross–Weir(NRW)方法[13]，但该方法存在几个问题：a) 当样品的厚度为半波长的整数倍时会发生谐振[14]，此时反射系数非常小，太赫兹波几乎无反射，使得提取结果错误；b) 中间变量的多值问题[15–17]和相位模糊问题[18–20]都会影响提取过程。而使用迭代方法进行复介电常数的提取可以避免上述问题。

最早用来提取介电常数的迭代方法为 NR 迭代法，该方法是牛顿在 17 世纪提出的一种在实数域和复数域上近似求解方程的方法。1986 年，W H Press 等从数值分析的角度详细地证明了该算法[21]。1990 年，Baker–Jarvis James 等首次将该算法用来求解复介电常数，他们用传输线的测试方法获得样品的散射参数，推导出了传输线中的散射参数 S_{11} 和 S_{21} 的表达式，并通过线性组合方式，构建了这 2 个散射参数和介电常数之间的关系式。通过 NR 迭代法进行求解，在 0~18 GHz 频段内测试并提取了聚四氟乙烯(PTFE)的介电常数[22]。但该方法需要 2 个散射参数才能进行提取，且频段较低。1997 年，M D Deshpande 等使用波导的单端口反射法获得样品的散射参数，用有限元法推导了散射参数 S_{11} 和介电常数之间的关系式，将该关系式作为迭代方程，用 NR 迭代法提取了 8~12 GHz 频段内 Teflon 和有机玻璃材料(Plexiglas material)的介电常数。该方法只需要反射参数即可提取介电常数，但因为使用波导测量方式，适用频段很低[23]。2007 年，A Elhawil 等首次将迭代方法与自由空间法进行了结合，利用准光系统测试了 W 波段(75~110 GHz)的尼龙、聚四氟乙烯等材料的散射参数 S_{11} 和 S_{21}，之后利用遗传算法提取介电常数。文章中采用自由空间法进行测量，因此测试频率能够达到 W 波段，但文章中没有给出散射参数与介电常数之间的关系式以及遗传算法的迭代过程[24]。2011 年，Yatendra 等使用填充样品的波导测量散射参数，推导了 S_{21} 和介电常数之间的关系式，并基于 NR 迭代法进行了求解，提取出 X 波段(8~12 GHz) Teflon 和 Plexiglas 的介电常数。该文给出了详细的波段内样品 S_{21} 的推导过程，但受限于波导装置，测量频段很低[25]。2017 年，Turgut Ozturk 等比较清晰地描述了迭代思路，使用双反射镜的准光系统测试样品的散射参数，利用 S_{21} 和介电常数之间的关系式构建迭代方程，并用 NR 迭代法求解，在 325~500 GHz 频段测试提取了聚氯乙烯(PVC)等材料的介电常数，但没有给出具体的迭代公式[12]。2020 年，Haotian Zhu 等在假设损耗角正切远远小于 1 的前提下，对计算过程进行了近似处理，推导出损耗角正切与介电常数实部之间的关系，将迭代过程变成了单变量的穷举法，简化了迭代过程，但由于该方法进行了计算上的近似处理，只适用于低损耗材料，在材料选取上具有一定的局限性[26]。2021 年，杨闯等给出了迭代法初值的估算方法，利用 S_{21} 信号的特点，通过 2 个峰值之间的频率差对复介电常数进行预估，进而作为初值进行迭代。该文给出了预估迭代法初值的一个思路，但对于迭代法本身没有做过多说明[27]。

本文利用自由空间法，将测试频段提高至太赫兹频段(325~500 GHz)，搭建了四抛物面镜组成的准光系统对样品进行测试，测量出带有样品信息的散射参数；然后从散射参数中提取出待测样品的复介电常数。文中给出了详细的 NR 方法的推导及迭代过程，并对不同初值以及不同迭代次数对提取结果的影响做了分步讨论，为复介电常数的测试和提取提供了值得借鉴的参考方案。

1 测试系统及提取原理

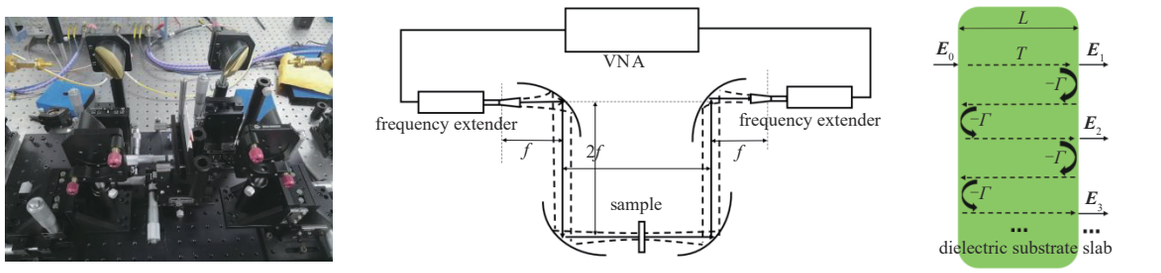
测试系统如图 1(a)~(b)所示。由矢量网络分析仪、扩频模块、2 个喇叭天线、4 个离轴抛物面镜以及样品夹具组成。矢量网络分析仪产生射频输出，经过扩频模块后上变频至太赫兹波，由喇叭天线耦合到自由空间中，经过 4 个离轴抛物面镜的准直聚焦后作用在待测样品上，随后信号沿设定光路传输并被探测。测试时将待测样品放置于系统中心的束腰位置处，整个测试在 325~500 GHz 的频段内进行。

样品为表面光滑的平行板，相对于同轴线、波导或谐振腔的测试方法，样品的制备较容易。准光系统对频率的适用性理论上没有限制，可以在很宽的频率范围内实现复介电常数的测量。4 个抛物面镜可以对太赫兹波进行准直，使样品处的电磁波为平面波，能量更加集中，也能避免衍射效应对测试的影响，从而能更好地进行材料测试，使测试过程及参数提取更加准确。另外，可以通过更换扩频模块进行多频段的参数测量，灵活性较好。

样品附近的空间模型如图 1(c)所示。其中 $\boldsymbol{E}_0$ 为入射的电磁波，$\boldsymbol{E}_1$、$\boldsymbol{E}_2$、$\boldsymbol{E}_3$ 分别为经过样品的透射电磁波，电磁波由空气垂直入射到样品前表面，经过厚度为 L 的样品，一部分透射出样品，一部分反射回前表面，透射部分的电磁波可表示为：

$$\boldsymbol{E}_1 = \left(1-\Gamma^2\right)T\boldsymbol{E}_0 \tag{1}$$

式中：Γ为从空气入射到样品的反射系数；T为样品内部的传输系数。



(a) physical picture of measuring system　(b) four-paraboloid mirror measurement system based on VNA　(c) electromagnetic wave transmission model of the sample

Fig.1 Testing system and electromagnetic wave transmission model
图1 测试系统及电磁波传输模型

反射部分的电磁波经过2次样品内部的反射之后，会再次透过样品，形成$\boldsymbol{E}_2$，同样的还会有$\boldsymbol{E}_3$等，将这些电磁波进行叠加，与入射电磁波相比，可以得到样品的理论散射参数S_{21}：

$$S_{21}=(1-\Gamma^2)T+(1-\Gamma^2)\Gamma^2T^3+\cdots=\frac{(1-\Gamma^2)T}{1-\Gamma^2T^2} \tag{2}$$

将式(2)中的Γ、T用复介电常数ε_{r}表示并进行化简，可以得到S_{21}和ε_{r}之间的表达式：

$$S_{21}=\frac{4\sqrt{\varepsilon_{\mathrm{r}}}\,\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\frac{2\pi fL}{c}\sqrt{\varepsilon_{\mathrm{r}}}}}{1+\varepsilon_{\mathrm{r}}+2\sqrt{\varepsilon_{\mathrm{r}}}-(1+\varepsilon_{\mathrm{r}}-2\sqrt{\varepsilon_{\mathrm{r}}})\,\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\frac{4\pi fL}{c}\sqrt{\varepsilon_{\mathrm{r}}}}} \tag{3}$$

将理论S_{21}的实部和虚部与测试得到的S_{21}作比较，这2个结果应该是相同的，即：

$$\begin{cases}S_{21C_\mathrm{r}}-S_{21m_\mathrm{r}}=0\\ S_{21C_\mathrm{i}}-S_{21m_\mathrm{i}}=0\end{cases} \tag{4}$$

式中S_{21C_r}、$S_{21\mathrm{m}_\mathrm{r}}$、$S_{21C_\mathrm{i}}$、$S_{21\mathrm{m}_\mathrm{i}}$分别为$S_{21}$的理论值实部、测试值实部、理论值虚部、测试值虚部。采用二元NR迭代法来求解，首先构造二元非线性方程组：

$$\begin{cases}f\left(\varepsilon_{\mathrm{r}}',\varepsilon_{\mathrm{r}}''\right)=S_{21C_\mathrm{r}}-S_{21m_\mathrm{r}}\\ g\left(\varepsilon_{\mathrm{r}}',\varepsilon_{\mathrm{r}}''\right)=S_{21C_\mathrm{i}}-S_{21m_\mathrm{i}}\end{cases} \tag{5}$$

式中：f和g均为复介电常数实部$\varepsilon_{\mathrm{r}}'$和复介电常数虚部$\varepsilon_{\mathrm{r}}''$的函数，当$\varepsilon_{\mathrm{r}}'$和$\varepsilon_{\mathrm{r}}''$这2个值求解正确时，函数$f$和$g$的值为0，此时变为式(4)。利用二元函数的Taylor公式将上述方程组展开，令$x=\varepsilon_{\mathrm{r}}'$，$y=\varepsilon_{\mathrm{r}}''$。可以获得2个变量的迭代公式：

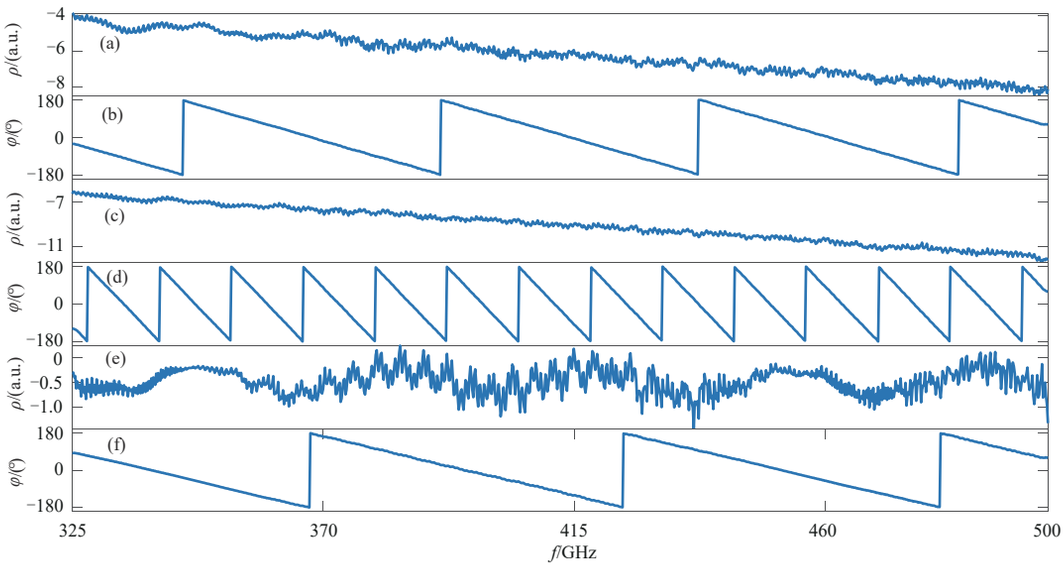
$$\begin{cases}x_{k+1}=x_k+\dfrac{f\left(x_k,y_k\right)g_y\left(x_k,y_k\right)-g\left(x_k,y_k\right)f_y\left(x_k,y_k\right)}{g_x\left(x_k,y_k\right)f_y\left(x_k,y_k\right)-f_x\left(x_k,y_k\right)g_y\left(x_k,y_k\right)}\\ y_{k+1}=y_k+\dfrac{g\left(x_k,y_k\right)f_x\left(x_k,y_k\right)-f\left(x_k,y_k\right)g_x\left(x_k,y_k\right)}{g_x\left(x_k,y_k\right)f_y\left(x_k,y_k\right)-f_x\left(x_k,y_k\right)g_y\left(x_k,y_k\right)}\end{cases} \tag{6}$$

式中：$f\left(x_k,y_k\right)$和$g\left(x_k,y_k\right)$为当前的迭代值代入式(5)的结果；$f_x\left(x_k,y_k\right)$、$f_y\left(x_k,y_k\right)$、$g_x\left(x_k,y_k\right)$、$g_y\left(x_k,y_k\right)$为式(5)中的函数f和g分别对x,y求偏导的结果。选取适当的初值和迭代次数可以求解出$\varepsilon_{\mathrm{r}}'$和$\varepsilon_{\mathrm{r}}''$，从而得到复介电常数。

2　数据获取

采用基于矢网与准光系统的自由空间法获取样品的散射参数，测试前首先对系统进行归一化校准。样品厚度在几毫米至十几毫米的范围内，为匹配所有样品的测量，在矢网中添加长度为20 mm的空气线校准件；夹具空载状态下进行归一化校准中的直通(Through)校准，然后将样品固定在系统中心的夹具上，测试并保存散射S参数。

为抑制噪声影响，将系统的中频带宽设为 100 Hz；均衡考虑测试效果及测试精确度后，将采样点数设为 1 001；将测试得到的散射参数 S_{21} 进行保存，记 S_{21} 为 $\rho e^{i\varphi}$ 的形式。测试的样品分别为 Teflon、PMMA、ABS。测试结果如图 2 所示，可以看出数据质量很好，信号平滑且杂波较少，相位也非常清晰。



(a~b) amplitude and phase of ABS; (c~d) amplitude and phase of PMMA; (e~f) amplitude and phase of Teflon

Fig.2 S_{21} of three samples

图 2 三种样品的 S_{21}

3 提取结果

在 325~500 GHz 频段获得 Teflon、ABS、PMMA 的散射参数，之后采用 NR 迭代法提取复介电常数，本文的迭代法只需使用 S_{21} 就可以进行参数提取。首先，分别设置复介电常数的实部和虚部的初始值以及迭代次数（初值选择对结果的影响及迭代次数的收敛性后文会进行分析）。这些初始值可以参考相关文献，然后基于式(5)进行迭代，不断更新初始值，直到达到迭代次数，从而在较小的误差范围内计算出复介电常数。提取结果如图 3 所示，图 3(a)为 ABS、PMMA、Teflon 3 种材料的复介电常数的实部，图 3(b)为 3 种材料的损耗角正切。可以看出，在整个频段内都是一致且稳定的，且该结果与文献结果一致性很好，如表 1 所示。因此本文的迭代方法可以正确提取出样品的复介电常数。

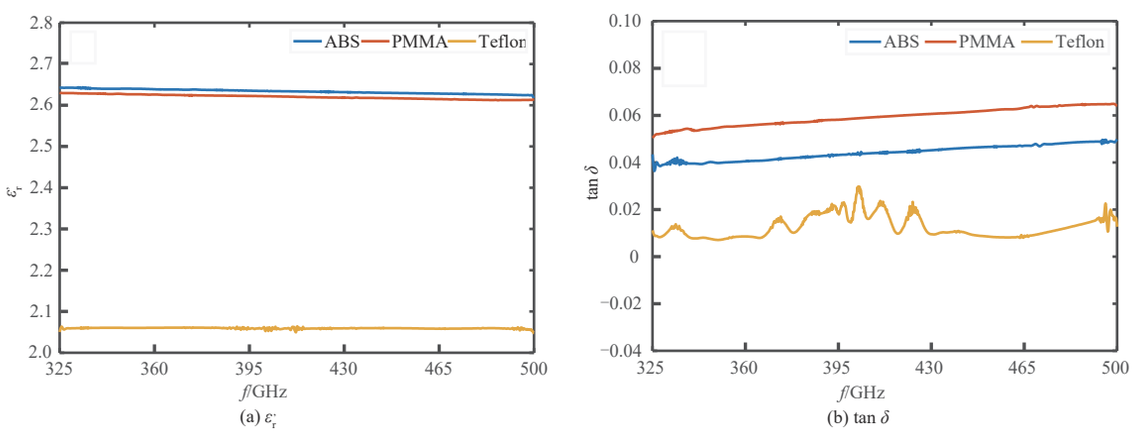


Fig.3 Complex dielectric constants of Teflon, ABS and PMMA extracted by NR iteration method

图 3 用 NR 迭代法提取出的 Teflon、ABS、PMMA 的复介电常数

表1 本文的提取结果及文献参考值

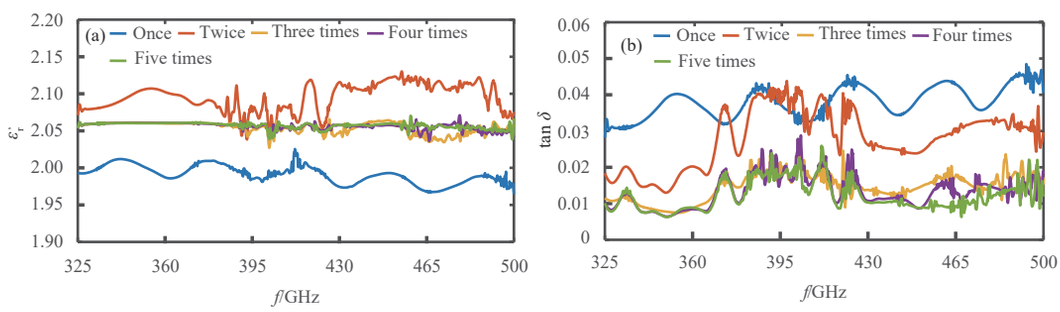
Table1 Extraction results and reference values

sample	ε_r'(325~500 GHz)	references	tan δ(325~500 GHz)	references
Teflon	2.05~2.06	2.07(300 GHz)[28] 2.05(450 GHz)[28] 2.04~2.06(325~500 GHz) [29] 2.05~2.06(0.1~1.6 THz)[30]	0.01~0.02	0.001(110 GHz)[32] 0.006(94 GHz)[33] 0.001~0.003(75~500 GHz)[30]
PMMA	2.61~2.63	2.58~2.67(0.1~1.6 THz)[30] 2.66~2.70(325~500 GHz)[29] 2.62(450 GHz)[28]	0.05~0.07	0.012(110 GHz)[32] 0.017~0.027(75~500 GHz)[30]
ABS	2.62~2.64	2.5~2.7(8~12 GHz)[31]	0.04~0.05	0.005(50 GHz)[34] 0.03(300~600 GHz)[35]

4　迭代过程分析

4.1 收敛过程

以 Teflon 为例，首先设置实部初始值为 2.0，虚部初始值为 0.02，迭代次数为 1，提取出复介电常数，然后不断增加迭代次数验证方法的收敛性。提取结果如图 4 所示。可以看出，随着迭代次数的增加，结果呈现出收敛的趋势，当迭代次数为 3 次时，已经基本收敛；另外 2 个样品也均可以在 5 次以内收敛，说明本文方法的收敛速度较快。



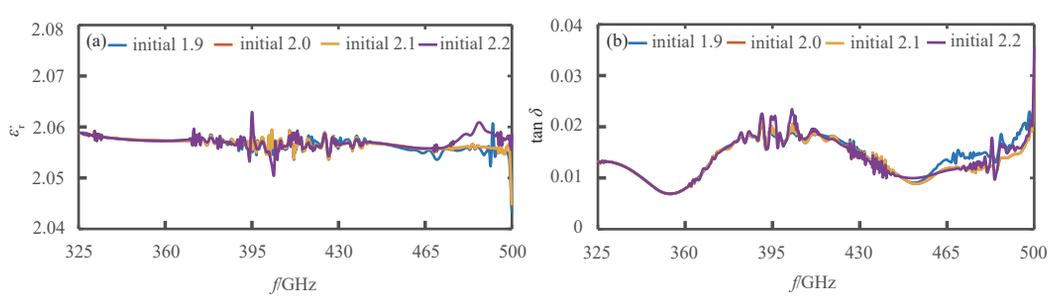
(a) ε_r'　　(b) tan δ

Fig.4 Convergence characteristics of ε_r' with different iteration times and tan δ

图 4 不同迭代次数的复介电常数实部的收敛特性和损耗角正切的收敛特性

4.2 选择不同初值的结果对比

对于迭代法，只有选取合适的初值范围，才能提取出正确的复介电常数。选取不同的初值对提取结果的影响，现有文献中很少提及相关内容的分析。本小节以 Teflon 为示例，选取了 4 个复介电常数实部的初值(分别为 1.9、2.0、2.1、2.2)进行测试，虚部的初值均设为 0.02。对这 4 个初值下得到的复介电常数进行比较，如图 5 所示。



(a) ε_r'　　(b) tan δ

Fig.5 Convergence of extraction results with different initial values

图 5 选取不同初值时提取结果的收敛性

从图中可以看出，提取出的复介电常数的实部以及损耗角正切在低频部分具有非常高的一致性，高频部分的误差也在千分位的量级，且当初值为 2.0 和 2.1 时，结果完全重合。因此本文方法得到的复介电常数对于初值

的选择具有较大的鲁棒性。对于Teflon，选择1.9到2.2之间的初值，均能获得正确的复介电常数，且不同初值的选择对于结果基本没有影响，具有很强的稳定性。

4.3 选取错误初值对提取过程的影响

NR迭代法有较高的收敛速度，收敛阶数为2阶，但它有很强的局部收敛性，只有满足函数单调变化、凹向不变等一些苛刻的条件时才会有全局收敛性。因此只有初值充分地接近正确解，才能确保迭代的收敛性。当选取的初值与正确值偏差过大时，会导致迭代无法收敛，不能提取出正确的复介电常数。本小节以Teflon为例，实部的初值分别设置为1.8(不能提取出正确结果)和2.0(可以提取出正确结果)。随着迭代次数的增加，可以看出错误的初值对于提取过程的影响。在第1次迭代时，2个初值对应于式(5)中的实部变化量均在0.1以内，如图6(a)~(b)所示。此时理论S_{21}与测试S_{21}的实部差值，即式(5)中的$f\left(\varepsilon_r', \varepsilon_r''\right)$均在变小，如图6(c)~(d)所示。说明2个变量的第一次迭代都是正确的。

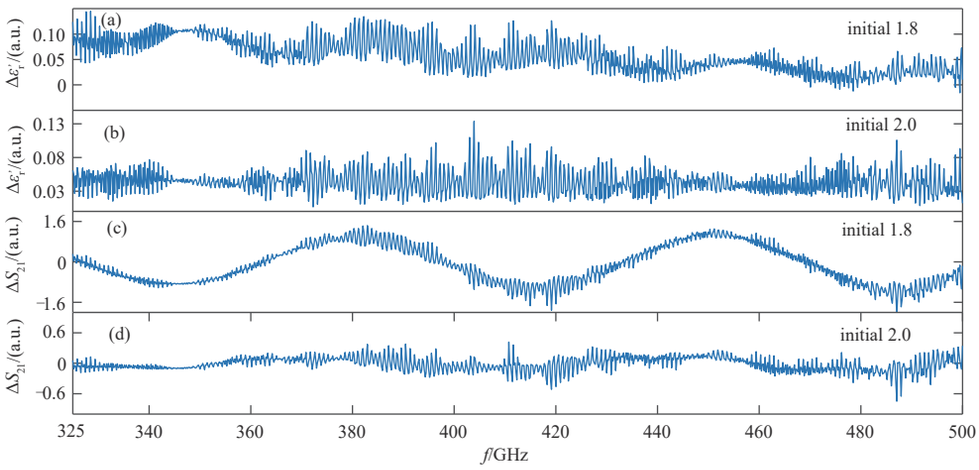


Fig.6 The changes of ε_r' and S_{21} at the first iteration when the initial values are 1.8 and 2.0
图6 初值分别为1.8和2.0时，第1次迭代ε_r'和S_{21}的变化

在第2次迭代时，2个初值对应的实部变化量开始出现较大偏差。初值2.0对应的变化量在0.02左右，而初值1.8对应的变化量在0.4左右。可以看出，当初值设置正确时，变化量会逐渐减小，结果会趋于收敛，初值设置错误会导致变化量发散，结果也不能收敛。此时的理论S_{21}与测试S_{21}的实部差值，也和实部变化量表现出来的现象一致，如图7所示。由迭代过程中间变量的分析可知，当初值选取不合适时，会导致迭代过程中的变化量发散，进而导致最终结果无法得到收敛。

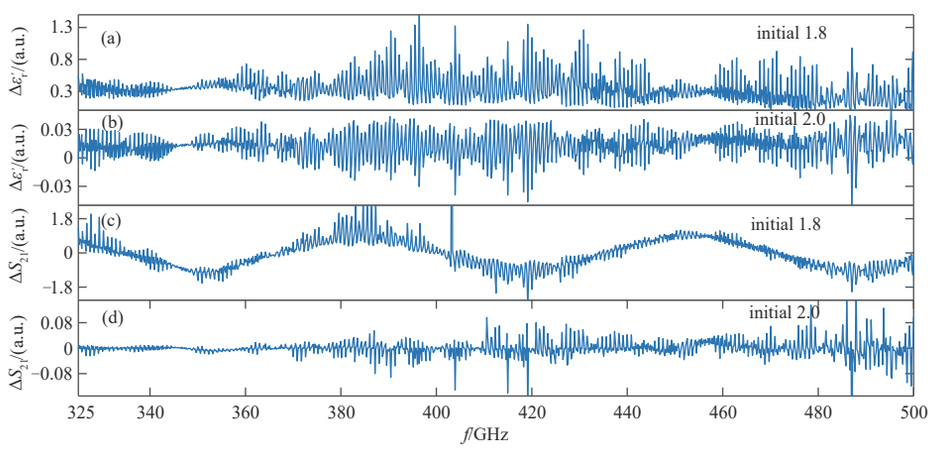


Fig.7 The changes of ε_r' and S_{21} at the second iteration when the initial values are 1.8 and 2.0
图7 初值分别为1.8和2.0时，第2次迭代ε_r'和S_{21}的变化

综上所述，本文通过对不同初值的测试，提供了一个初值的选取范围。对于Teflon，当初值的选取范围在正确值的±7.7%以内，提取结果正确且收敛，收敛度在5‰以内。当初值选取超出收敛范围，会导致提取结果越来越发散，无法得出正确解。

5　结论

本文验证了在325~500 GHz频段，利用基于VNA的自由空间法测试样品的散射参数，以及利用NR迭代法提取复介电常数的有效性。本文方法有很多优点：测量方面，对于样品的要求很低，无需特殊制备即可测试，且只需要测量出样品的透射参数S_{21}就可以进行参数提取，不需要反射参数S_{11}；参数提取方面，相比于NRW方法，避免了相位模糊、反射参数的测量误差对于提取结果的影响等问题。本文方法也有提升的空间，在未来的工作中，可以通过优化迭代过程来扩大初值的选择范围，或对比其他的数值计算方式，选择出最优的迭代方法。

参考文献：

[1] THEOFANOPOULOS P C,SAKR M,TRICHOPOULOS G C. Multistatic terahertz imaging using the Radon transform[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019,67(4):2700-2709.

[2] FHAGER L O,HEUNISCH S,DAHLBERG H,et al. Pulsed millimeter wave radar for hand gesture sensing and classification[J]. IEEE Sensors Letters, 2019,12(3):1-4.

[3] SMITH K,CSECH C,SHAKER G,et al. Gesture recognition using mm-wave sensor for human-car interface[J]. IEEE Sensors Letters, 2018,2(2):1.

[4] YU Yingrui,HONG Wei,JIANG Zhihao,et al. E-band low-profile, wideband 45° linearly polarized slot-loaded patch and its array for millimeter-wave communications[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018,66(8):4364-4369.

[5] BERGMAN D. The dielectric constant of a composite material—a problem in classical physics[J]. Physics Reports, 1978,43(9):377-407.

[6] VOLKSEN W,MILLER R,DUBOIS G. Low dielectric constant materials[J]. Chemical Reviews, 2010,110(1):56-110.

[7] CHIU T. Dielectric constant measurement technique for a dielectric strip using a rectangular waveguide[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2003,52(5):1501-1508.

[8] JIANG G Q,WONG W H,RASKOVICH E Y,et al. Open-ended coaxial-line technique for the measurement of the microwave dielectric constant for low-loss solids and liquids[J]. Review of Scientific Instruments, 1993,64(6):1614-1621.

[9] LYU Peng,ZHANG Liangjing,LI Shiwei,et al. Measurement of dielectric properties of rare earth oxides by resonance cavity perturbation method[J]. Journal of Physics and Chemistry of Solids, 2021(160):110362.

[10] KAATZE Udo. Complex permittivity of water as a function of frequency and temperature[J]. Journal of Chemical & Engineering Data, 1989,34(4):371-374.

[11] TOSHIHIDE T,KATSUMI F,KAORI F,et al. Development of complex relative permittivity measurement system based on free-space in 220 GHz-330 GHz range[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2015,5(1):102-109.

[12] TURGUT O, MARTIN H, IHSAN U. Development of measurement and extraction technique of complex permittivity using transmission parameter S_{21} for millimeter wave frequencies[J]. Journal of Infrared,Millimeter and Terahertz Waves, 2017(12):381510-381520.

[13] WEIR W B. Automatic measurement of complex dielectric constant and permeability at microwave frequencies[J]. Proceeding of the IEEE, 1974,62(1):33-36.

[14] PAULA A L D, REZENDE M C, BARROSO J J. Modified Nicolson-Ross-Weir(NRW) method to retrieve the constitutive parameters of low-loss materials[C]// 2011 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC 2011). Natal,Brazil:IEEE, 2011:488-492.

[15] ABBAS Z, POLLARD R D, KELSALL R W. Complex permittivity measurements at Ka-band using rectangular dielectric waveguide[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2001,50(5):1334-1342.

[16] BAUM Thomas, THOMPSON Lachlan, GHORBANI Kamran. Complex dielectric measurements of forest fire ash at X-band frequencies[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2011,8(5):859-863.

[17] HAJISAEID E, DERICIOGLU A, AKYURTLU A. All 3D printed freespace setup for microwave dielectric characterization of materials[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2018,67(8):1877-1886.

[18] ROCHA L S,JUNQUEIRA C C,GAMBIN E,et al. A free space measurement approach for dielectric material characterization[C]// 2013 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave & Optoelectronics Conference(IMOC). Riode Janeiro,Brazil:IEEE, 2013:4-7.

[19] OZTURK M,SEVIM U K,AKGOL O,et al. An electromagnetic non-destructive approach to determine dispersion and orientation of fiber reinforced concretes[J]. Measurement, 2019(138):356-367.

[20] DEFFENBAUGH P I,RUMPF R C,CHURCH K H. Broadband microwave frequency characterization of 3D printed materials[J]. IEEE Transactions on Components,Packaging and Manufacturing Technology, 2013,3(12):2147-2155.

[21] PRESS W H,FLANNERY B P,TEUKOLSKY S A,et al. Numerical recipes:the art of scientific computing[M]. Cambridge County, England,UK:Cambridge University Press, 1986.

[22] BAKER-JARVIS James,VANZURA Eric J,KISSICK William A. Improved technique for determining complex permittivity with the transmission/reflection method[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1990,38(8):1096-1103.

[23] DESHPANDE Manohar,REDDY Jagadeswara,TIEMSIN Pacita. A new approach to estimate complex permittivity of dielectric materials at microwave frequencies using waveguide measurements[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1997,45(13):359-365.

[24] ELHAWIL A,ZHANG L,STIENS J,et al. A quasi-optical free-space method for dielectric constant characterization of polymer materials in mm-wave band[C]// Proceedings Symposium IEEE/LEOS Benelux Chapter. Brussels,Belgium:IEEE, 2007.

[25] SINGH Y K, CHAKRABARTY A. A novel technique to estimate complex permittivity of low-loss dielectric materials in Gigahertz frequency band[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011,18(1):168-175.

[26] ZHU Haotian, WU Ke. Complex permittivity measurement of dielectric substrate in sub-THz range[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2021,11(1):2-15.

[27] YANG C,WANG J,YANG C. Estimation methods to extract complex permittivity from transmission coefficient in the terahertz band[J]. Optical and Quantum Electronics, 2021,53(8):1-10.

[28] LAMB J W. Miscellaneous data on materials for millimetre and submillimetre optics[J]. International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 1996,17(12):1997-2232.

[29] ZHANG Xiansheng, CHANG Tianying, CUI Hongliang, et al. A free-space measurement technique of terahertz dielectric properties[J]. Journal of Infrared,Millimeter and Terahertz Waves, 2017,38(3):356-365.

[30] CHANG Tianying,ZHANG Xiansheng,ZHANG Xiaoxuan, et al. Accurate determination of dielectric permittivity of polymers from 75 GHz to 1.6 THz using both *S*-parameters and transmission spectroscopy[J]. Applied Optics, 2017,56(12):3287-3292.

[31] YANG Chuang. A position-independent reflection-only method for complex permittivity and permeability determination with one sample[J]. Frequenz, 2020,74(3/4):163-167.

[32] ALIREZA Kazemipour,MARTIN Hudlicka,SEE-KHEE Yee,et al. Design and calibration of a compact quasi-optical system for material characterization in millimeter/submillimeter wave domain[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2015,64(6):1438-1445.

[33] KADABA Prasad. Simultaneous measurement of complex permittivity and permeability in the millimeter region by a frequency-domain technique[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1984,33(4):336-340.

[34] NICOLÁS Reyes,FRANCISCO Casado,VALERIA Tapia,et al. Complex dielectric permittivity of engineering and 3D-printing polymers at Q-band[J]. Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, 2018,39(11):1140-1147.

[35] PENG H Y,YANG C S,WEI Y A,et al. Terahertz complex refractive index properties of acrylonitrile butadiene styrene with rice husk ash and its possible applications in 3D printing techniques[J]. Optical Materials Express, 2021,11(9):2777-2786.

作者简介：

贾　锐(1994-)，男，在读硕士研究生，主要研究方向为太赫兹波段复介电常数提取.email:jiaruichn@163.com.

许　靖(1996-)，男，在读博士研究生，主要研究方向为太赫兹波段检测与成像.

张振伟(1977-)，男，硕士，高级实验师，主要研究方向为太赫兹波谱、成像及无损检测.

黄　辉(1977-)，男，博士，副研究员，主要研究方向为微波网络参数测试技术.

高小强(1990-)，男，博士，高级工程师，主要研究方向为太赫兹计量测试技术及超快光谱应用技术.

刘　林(1990-)，男，博士，高级工程师，主要研究方向为太赫兹无损检测及太赫兹计量技术.

缪寅宵(1974-)，男，硕士，研究员，主要研究方向为测试计量技术及仪器研究.

张存林(1961-)，男，博士，教授，博士生导师，主要研究方向为太赫兹科学与技术等.

赵跃进(1958-)，男，博士，教授，主要研究方向为光电仪器设计、红外成像技术、太赫兹技术等.