

doi: 10.11720/wtyht.2022.1248

丁晓,莫思特,李碧雄,等.混凝土内部裂缝对电磁波传输特性参数的影响[J].物探与化探,2022,46(1):160-168.<http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.1248>

Ding X, Mo S T, Li B X, et al. Impacts of cracks in concrete on characteristic parameters of electromagnetic wave transmission[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(1): 160-168. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.1248>

混凝土内部裂缝对电磁波传输特性参数的影响

丁晓¹, 莫思特¹, 李碧雄², 黄华¹

(1. 四川大学 电气工程学院, 四川 成都 610065; 2. 四川大学 建筑与环境学院, 四川 成都 610065)

摘要: 混凝土的使用越来越广泛,其健康状况越来越被重视。混凝土裂缝的发生发展特征是混凝土健康状况的重要表征参数。钢筋是混凝土固有结构,针对混凝土内部的裂缝,提出一种应用钢筋天线的裂缝监测方法,设置内嵌于混凝土中的发射、接收钢筋天线对,通过天线对 S_{21} 参数的幅值来检测混凝土内裂缝。构建 CST Studio Suite 软件仿真模型,利用 CST Studio Suite 软件计算钢筋天线对 S_{21} 参数幅值,分析 S_{21} 参数幅值与裂缝状态的关系,结果表明混凝土内部的裂缝状态会对 S_{21} 参数幅值产生明显的影响,根据 S_{21} 参数幅值的特征可以实现裂缝检测。对无裂缝模型和有裂缝模型的 S_{21} 参数幅值进行求比值处理,其比值超过某个阈值即认为能辨识裂缝,并将该段能辨识裂缝的频带定义为特征频带。仿真结果发现,不同裂缝厚度、不同裂缝角度、不同裂缝位置时的 S_{21} 参数幅值均有显著变化,证明了在混凝土内设置钢筋发射、接收天线对,测量电磁波传播的 S_{21} 参数,通过 S_{21} 参数幅值可以判断混凝土裂缝及裂缝特征。

关键词: 混凝土;裂缝;钢筋天线;电磁波; S 参数幅值

中图分类号: P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2022)01-0160-09

0 引言

随着国家现代化、城市化的推进,重大工程如大坝、桥梁、隧道建设越来越多,工业与民用建筑日益密集,混凝土为上述建筑的重要材料,混凝土健康监测在结构运行中发挥着越来越大的作用。裂缝是混凝土最为常见的病害之一,如果不能及时发现并处理建筑物关键部位的裂缝,将会带来十分严重的后果。早期裂缝的宽度和长度较小且存在于混凝土内部,摄影和激光扫描检测手段不具有穿透性,难以对内部裂缝进行精准有效的检测^[1]。目前国内外研究者提出的对于混凝土内部裂缝的检测方法可大致分为两类:破坏性检测与无损检测^[2]。破坏性检测方法主要包括凿槽、钻孔取心、孔内电视法,这些方法对混凝土结构具有破坏性,检测效率低,难以大量多次进行。无损检测的典型方法有射线探伤法、超

声波检测法、电磁波检测法^[3];射线探伤法在使用过程中如果操作不当会对人体造成很大伤害,且射线的穿透能力不强,目前很少使用;超声波检测法主要是通过超声波在混凝土传播后发生的波形变化来判断混凝土的内部情况,不能用于不平整的外表面和复杂的建筑体裂缝检测。

电磁波探测法具有分辨率高、探测速度快、探测范围广、探测过程连续等优点。1904~1930 年是电磁波检测法的萌芽阶段,当时该领域最具代表性的 Hulsenbeek 学者首次提出根据介质变化会使电磁波产生反射的原理,利用电磁波技术探测地下结构^[4]。1950 年至今人们对电磁波探测技术的运用逐渐成熟,现如今最为常用的手段是利用探地雷达向混凝土内传送电磁波^[5]。探地雷达工作时,在主机控制下,脉冲源产生周期性的毫微秒脉冲信号并直接馈送给发射天线,经由发射天线耦合到地下的信号,在传播路径上遇到不同介质的分界面(裂缝

收稿日期: 2021-05-07; 修回日期: 2021-09-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(51678379)

第一作者: 丁晓(1995-),男,2019 年至今就读于四川大学,主要研究方向为混凝土裂缝传感检测。Email:610464048@qq.com

通讯作者: 莫思特(1969-),男,副教授,硕士生导师,主要从事地质灾害监测、结构健康监测研究等工作。Email:mosite@126.com

腔体与混凝土的分界面)则产生反射信号;位于地面上的接收天线将接收到的地下反射回波直接传输到接收机,信号经接收机整形和放大等处理后,再经电缆传输到雷达主机和微机,然后再对数据进行处理^[5-7]。可见,探地雷达对混凝土内部裂缝的检测要经过一系列繁琐的步骤,且容易受到外部诸多条件的影响,不具有实时性、便捷性、高效性。针对以上问题,本文提出一种新的裂缝传感检测法。该方法直接将建筑体内的钢筋作为天线,并由钢筋天线向周围的混凝土发送电磁波,通过天线端口的 S 参数判断混凝土内的裂缝情况。钢筋是建筑体内固有的一部分,将钢筋作为传感天线能够做到对混凝土内部裂缝实时检测,无需额外装配传感器,且其寿命与结构寿命等长,如能用于混凝土裂缝传感,将可能孕育混凝土裂缝监测变革性成果。

1 电磁波传播模型的构建

1.1 混凝土内部裂缝对电磁波传播的影响分析

混凝土中的裂缝一般充斥着空气,空气的相对介电常数为 1,混凝土的相对介电常数为 6,差异较大。当电磁波到达 2 种不同介质的界面处时会发生反射、折射、衍射等电磁波现象,入射波、反射波、折射波遵循电磁波传播规律^[8]。在本文的研究中,钢筋天线发送的电磁波首先经过混凝土介质,接着又穿过空气,然后再次进入混凝土中,经过若干次的反射与折射^[9],如图 1 所示。

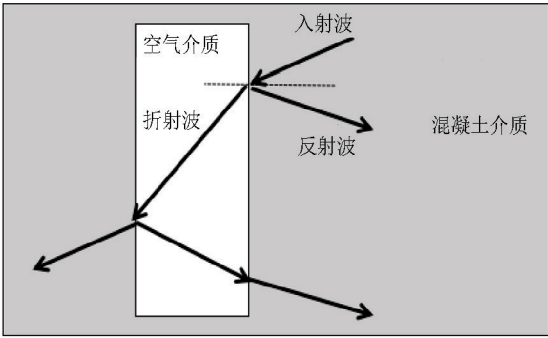


图 1 电磁波在混凝土裂缝的传播情况
Fig.1 Propagation of electromagnetic wave in concrete cracks

1.2 S_{21} 参数

在高频电路中,电压和电流无法直接测量,不能再集中参数电路的欧姆定律来对其进行分析,而应引入相应的分布参数电路的分析方法。对于分布参数电路,需要一种在微波波段能用直接测量方法确定的网络参数,考虑到微波波段可测的电参量就

是功率和反射系数,因此从归一化的入射波和反射波出发,定义一组新的网络参数——散射参数,简称 S 参数。S 参数通常表示为 S_{ij} , j 为输入端口, i 为输出端口, S_{ij} 即为端口 i 与端口 j 的能量(功率)之比^[8-10]。本文的研究中仅有 2 个端口,分别定义为发射天线端口 1 和接收天线端口 2,故本文后续仅讨论 S_{21} 参数。

1.3 混凝土内部钢筋的天线功能化

设置 2 根外形相同的圆角矩形环状钢筋天线(图 2)分别作为发射天线和接收天线,在发射天线的钢筋环端口处设置激励信号,促使钢筋环产生高频电流,向外辐射电磁波;接收天线在端口处接负载。在发射天线所传送电磁波的作用下,接收天线激起感应电动势,产生感应电流,感应电流从端口流入负载^[8-12]。检测发射天线端口处的能量 x_1 和接收天线端口处的能量 x_2 ,通过 $S_{21} = x_2/x_1$ 即可计算出 S_{21} 参数的幅值。当混凝土中有裂缝时,裂缝导致的电磁波现象使得接收天线接收到的电磁波受到影响,故会引起 S_{21} 参数幅值的改变^[13]。

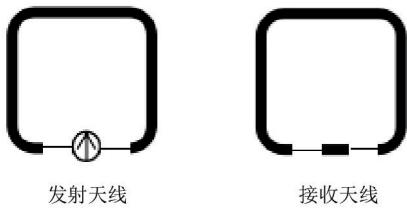


图 2 发射天线与接收天线

Fig.2 Transmitting antenna and receiving antenna

1.4 混凝土构件内部电磁波传播模型

混凝土内部钢筋的主要成分为铁,属于优良的导电材料,故钢筋可以用作天线。钢筋是现代混凝土构件的必要组成部分且与混凝土紧密结合,若直接将其作为传感器,不仅省去了传统传感器的凿槽、埋线等繁琐工作^[13],还有望实现混凝土内任意分布且全生命周期的裂缝监测。为了探究混凝土内部裂缝对电磁波传播特性的影响,以钢筋天线对作为发射天线和接收天线,基于混凝土构件自身构建电磁波传播模型。作为前期探索性研究,考虑到天线的辐射方向和辐射效率,将钢筋天线垂直于裂缝面放置,如图 3 所示。

2 仿真模拟分析

采用三维全波电磁场仿真软件 Computer Simulation Technology (CST) 进行仿真模拟分析,选择时

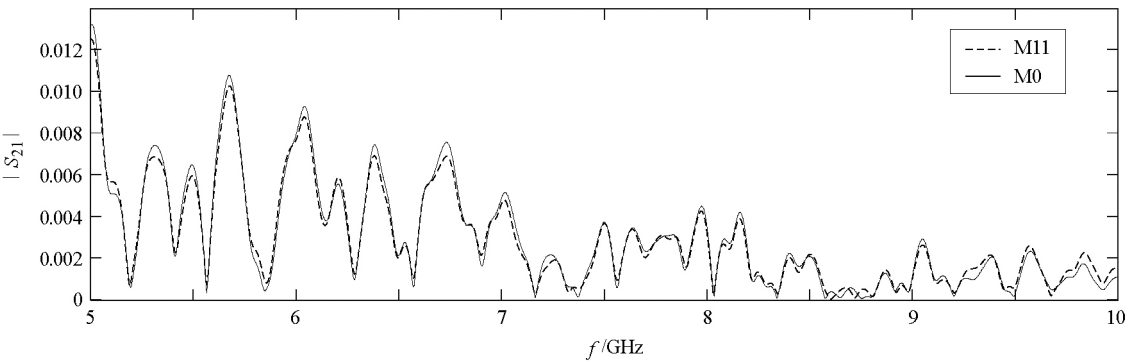


图 6 S_{21} 参数幅值在 5~10 GHz 的频率范围内有裂缝与无裂缝合并

Fig.6 Combined graph of S_{21} parameters with and without cracks in the frequency range of 5~10 GHz

绘制出比值 $Q_{S_{21}}$ 的曲线,如图 7 所示。考虑到接收天线能量为 2 倍、4 倍、8 倍的关系,而能量与幅值平方成正比,因此设定 $Q_{S_{21}}$ 的 3 个阈值限:1.414、2、2.828,取 20 倍对数后近似为 3、6、9,依次分别记为 T_3 、 T_6 、 T_9 。为了表征裂缝的识别效果,将其对数比值在 3~6、6~9、9 以上的频率点分别定义为可以辨识裂缝的特征频率、容易辨识裂缝的特征频率、极易

辨识裂缝特征频率。

根据每一个特征频带的上限频率 $f_{\max}$ 和下限频率 $f_{\min}$,求出各个频带的带宽 B_w 和中心频率 f_o :

$$B_w = f_{\max} - f_{\min}, \tag{2}$$

$$f_o = \frac{f_{\max} + f_{\min}}{2}。 \tag{3}$$

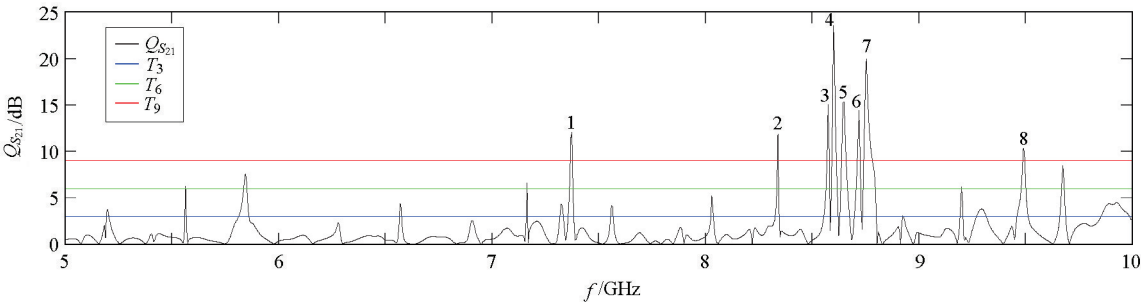


图 7 S_{21} 参数在 5~10 GHz 的频率范围内有裂缝与无裂缝的频率特征

Fig.7 S_{21} parameter takes logarithm as the ratio of crack and no crack in the frequency range of 5~10 GHz

图 7 中 5~10 GHz 的频率范围内存在 21 个可辨识裂缝的特征频带,包含容易辨识特征频带 13 段,极易辨识特征频带 8 段(图 7 中已用数字标出)。这 8 段极易辨识特征频带都集中在 7~10 GHz 的高频范围,其中最低特征频率的范围是 7.367~7.378 GHz,中心频率为 7.373 GHz,带宽为 11 MHz;最高特征频率的范围是 9.487~9.497 GHz,中心频率为 9.492 GHz,带宽为 10 MHz;带宽最宽的特征频带为 8.742~8.783 GHz,达到了 41 MHz,最大比值的频点为 8.6 GHz,其比值达到了 24.028 dB,详见表 2。

3.2 不同裂缝厚度对检测效果的影响

通过 M11、M13、M15、M17 的仿真结果(图 8),可以发现不同裂缝厚度对 S_{21} 幅值的影响。从图 8 可以看出:在 5.4~7.3 GHz 频率范围内,大体呈现出

表 2 极易辨识特征频参数

Table 2 Characteristic frequency band for very easy identification of cracks

序号	中心频率/GHz	带宽/MHz	最大比值/dB
1	7.373	11	10.961
2	8.34	5	12.751
3	8.576	11	15.596
4	8.603	22	24.028
5	8.649	22	13.959
6	8.719	14	15.022
7	8.762	41	19.699
8	9.492	10	10.619

裂缝厚度越小 S_{21} 幅值越大的趋势,在 8.5~9 GHz 范围内呈现裂缝厚度越大 S_{21} 幅值越小的趋势;其他频点处则未呈现出简单的线性关系。

利用式(2)分别计算出 M13、M15、M17 的 S_{21} 幅

值与 M0 模型的 S_{21} 幅值比值,即 $Q_{S_{21}}$,结果如图 9 所示。可以看出,随着裂缝的厚度从 0.1 cm 逐渐变为 0.3、0.5、0.7 cm,可辨识特征频带由 20 段分别变为 27 段、22 段、35 段,其中极易辨识特征频带由 8 段分别变为 13 段、16 段、20 段。记录每一段可辨识特征频带的带宽和中心频率,发现中心频率为 7.165 GHz 的可辨识特征频带在 4 种不同裂缝厚度中都存在,其带宽分别为 0.007、0.02、0.024、0.035 GHz(表 3、图 10)。由此可见,随着裂缝厚度增大,扫频范围内特征频带数随之增多,可辨识特征频带中公有中心频率下的带宽也随之增大;当裂缝厚度从 0.1 ~

0.7 cm 变换时,使用 7.165 GHz 电磁波,根据特征频率带宽可以识别混凝土裂缝厚度。

表 3 不同裂缝厚度辨识效果对比
Table 3 Comparison of identification effect of different crack thickness

裂缝模型	可以辨识/段	容易辨识/段	极易辨识/段	公有中心频率带宽/MHz
M11	21	13	8	7
M13	27	22	13	20
M16	33	22	16	24
M17	35	28	20	35

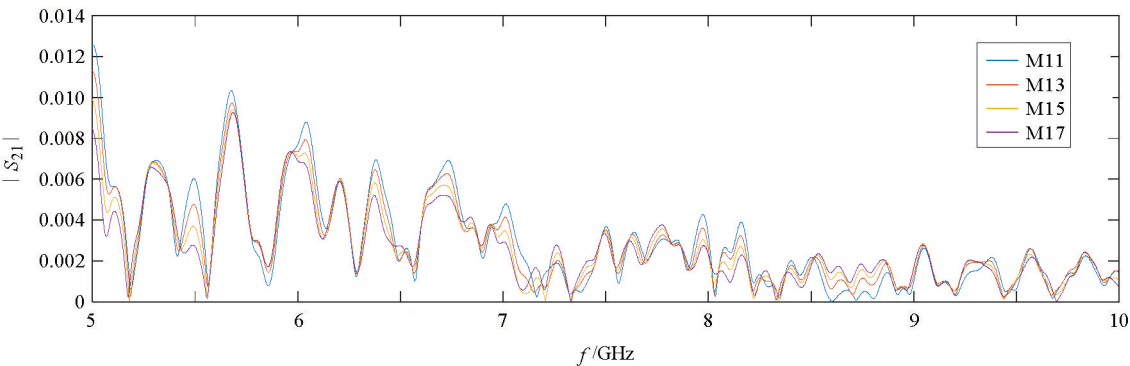


图 8 5~10 GHz 频率范围内不同裂缝厚度的 S_{21} 模值

Fig.8 The modulus of S_{21} parameters with different crack thickness in the frequency range of 5~10 GHz

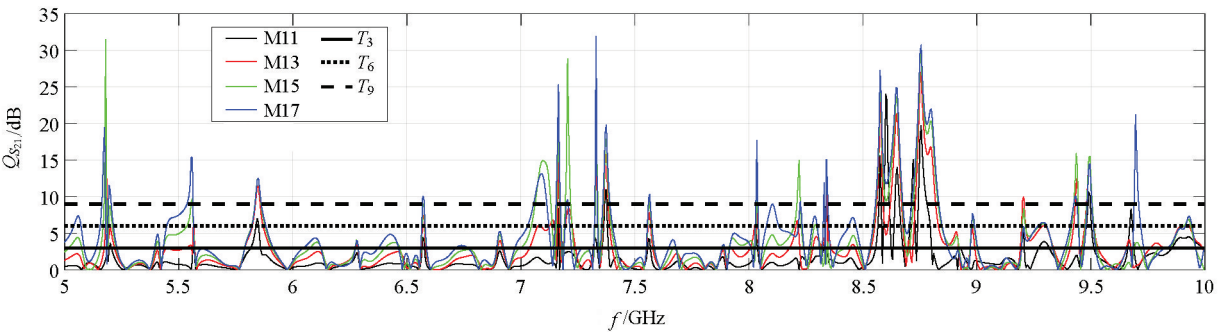


图 9 5~10 GHz 频率范围内不同裂缝厚度的 $Q_{S_{21}}$

Fig.9 The ratio $Q_{S_{21}}$ with different crack thickness in the frequency range of 5~10 GHz

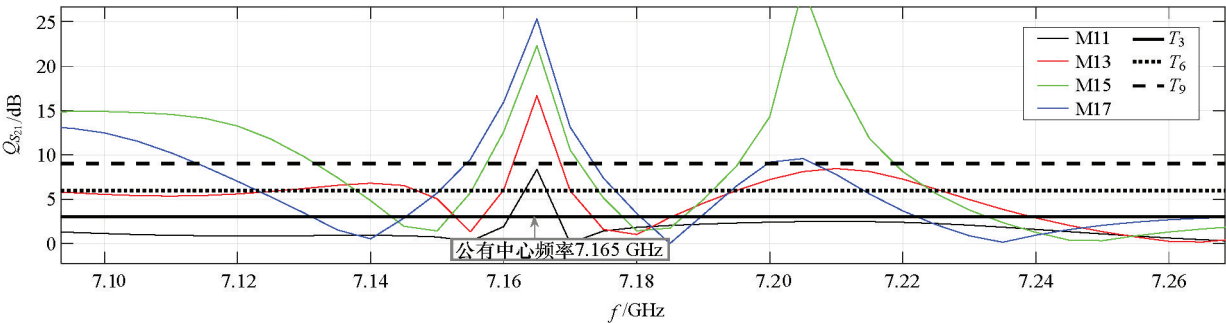


图 10 不同厚度裂缝公有中心频率附近的特征频带

Fig.10 Characteristic frequency band near common center frequency of crack with different thickness

3.3 不同裂缝角度对 S 参数的影响

通过 M23、M26、M29 的仿真结果可以发现不同裂缝角度对 S_{21} 幅值的影响。M1、M23、M26、M29 的 S_{21} 幅值仿真结果如图 11 所示。可以看出,不同裂缝角度对 S_{21} 幅值有明显的影响,其幅值只有部分频率范围呈现夹角越小,幅值越大的关系,其他频率则表现出其关系较大的不确定性。将裂缝模型 M23、M26、M29 的 S_{21} 参数幅值分别与 M0 模型的 S_{21} 参数幅值利用式(2)求比值,所得结果见表 4、图 12。可见,随着裂缝的角度从 0° 逐渐变换到 30° 、 60° 、 90° ,可辨识特征频带由 21 段分别变为 17、19、25 段,其中极易辨识特征频带由 8 段变为 6、7、9 段。

裂缝角度从 M26 到 M29 极易辨识特征频带分布变化较明显,表现为中频段(7~8 GHz)的极易识别特征频带数增加了 2 段,而高频段(9~10 GHz)内的极易识别特征频带减少了 1 段。同样地,记录每

一段可辨识特征频带的带宽和中心频率,发现中心频率为 8.569 GHz 的可辨识特征频带共同存在于 4 种不同角度的裂缝中,其带宽分别为 0.029、0.037、0.034、0.043 GHz,如图 13 所示。

由此可见,当裂缝处于某个位置并在一定范围内变换角度时,采用 8.569 GHz 的电磁波,通过计算带宽来辨识裂缝角度。

表 4 不同裂缝角度辨识效果对比
Table 4 Comparison of identification effect of different crack angles

裂缝模型	可以辨识 /段	容易辨识 /段	极易辨识 /段	公有中心频率带宽/MHz
M11	21	13	8	29
M23	17	11	6	37
M26	19	13	7	34
M29	25	15	9	43

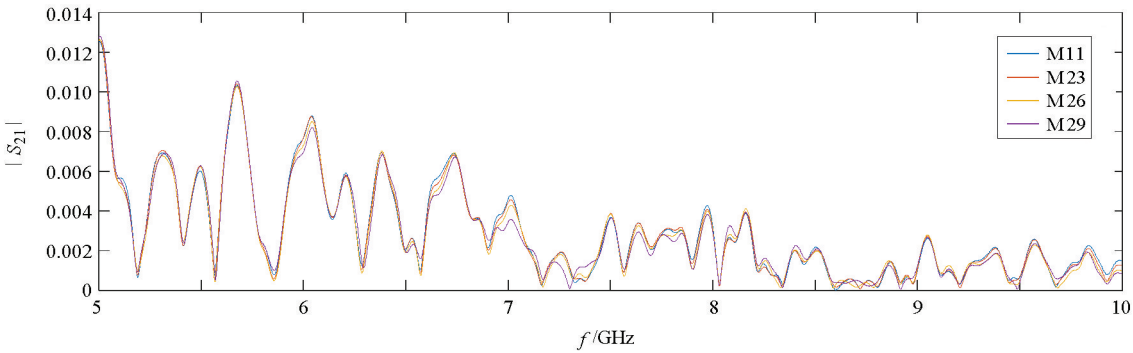


图 11 5~10 GHz 频率范围内不同裂缝角度的 S_{21} 参数之模值

Fig.11 The modulus of S_{21} parameters with different crack angles in the frequency range of 5~10 GHz

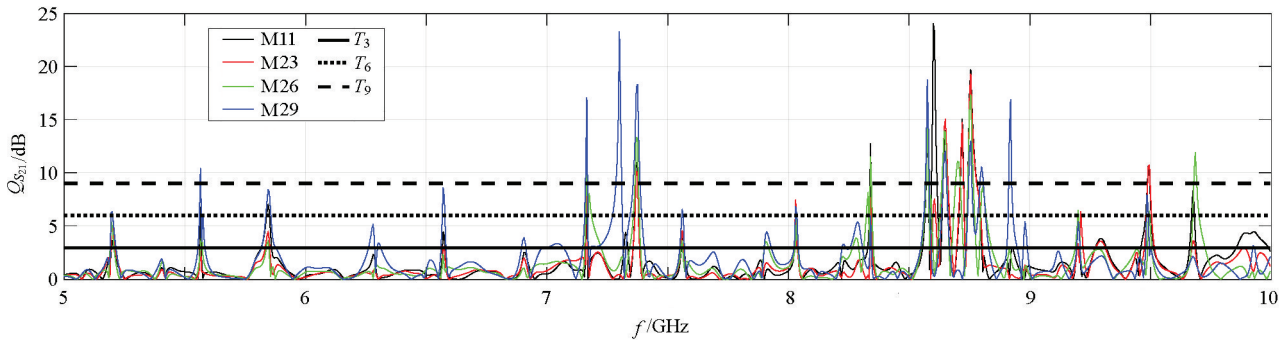


图 12 S_{21} 幅值在 5~10 GHz 的频率范围内有裂缝与无裂缝的比值 $Q_{S_{21}}$ (M11,M23,M26,M29)

Fig.12 The ratio $Q_{S_{21}}$ of crack to no crack of S_{21} amplitude in the frequency range of 5~10 GHz (M11,M23,M26,M29)

3.4 不同裂缝位置对 S 参数的影响

通过 M11、M31、M32、M33 的仿真结果,可以发现不同裂缝位置对 S_{21} 幅值参数的影响。M11、M31、M32、M33 的 S_{21} 幅值仿真得出的结果如图 14 所示,可以看出,5~10 GHz 率范围内不同裂缝位置对 S_{21} 的幅值有明显影响,但呈现出较为复杂的非线性关

系,即裂缝和天线 1 的距离与 S_{21} 幅值不能用简单的线性关系描述。然后依然利用上文所述的方法对该组数据进行处理,即将裂缝模型 M31、M32、M33 的 S_{21} 参数幅值分别与 M0 模型的 S_{21} 参数幅值利用式(2)求比值 $Q_{S_{21}}$,所得结果如图 15 所示。可以看出,随着裂缝由初始位置逐渐离发射天线 A 越来越近,

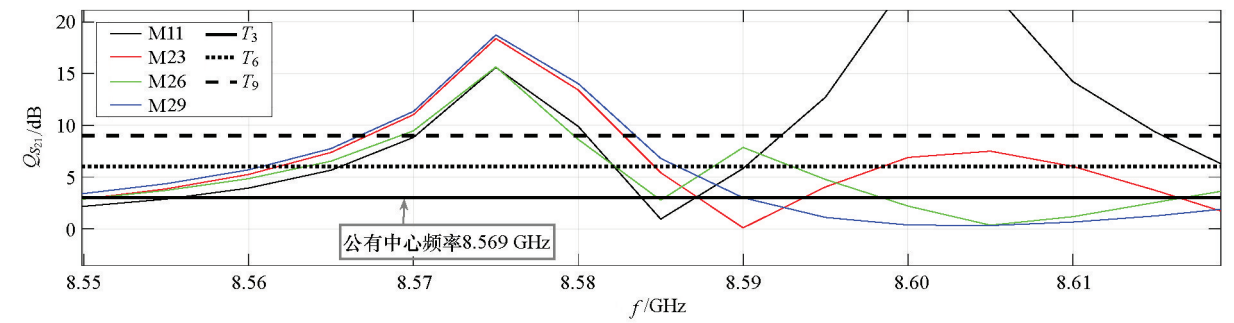


图 13 不同角度裂缝公有中心频率附近的特征频带

Fig.13 Characteristic frequency band near common center frequency of crack with different angles

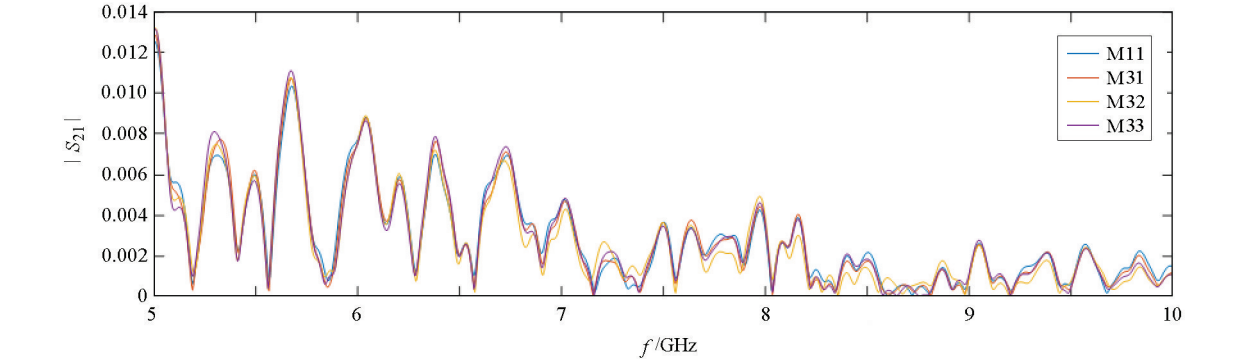


图 14 5~10 GHz 频率范围内不同裂缝位置的 S_{21} 参数之模值

Fig.14 The modulus of S_{21} parameters with different crack locations in the frequency range of 5~10 GHz

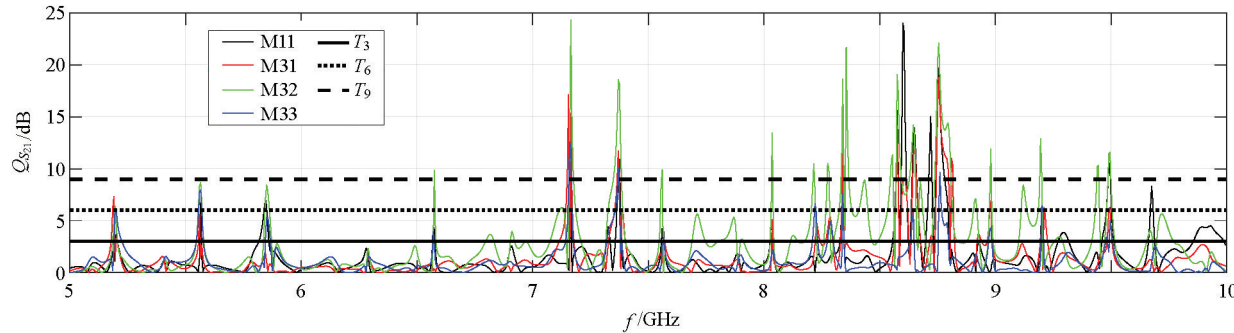


图 15 S_{21} 幅值在 5~10 GHz 的频率范围内有裂缝与无裂缝的比值 $Q_{S_{21}}$ (M11,M31,M32,M33)

Fig.15 The ratio $Q_{S_{21}}$ of crack to no crack of S_{21} amplitude in the frequency range of 5~10 GHz(M11,M31,M32,M33)

可辨识特征频段由 21 段变为 22 段、30 段、16 段,其中极易辨识特征频段由 8 段变为 8 段、18 段、3 段。详见表 5。

再次利用上文中的方法计算所有可辨识特征频段的带宽和中心频率,发现其中有一段中心频率为 8.772 GHz 的可辨识特征频段存在于 4 个不同位置的裂缝中,其带宽分别为 0.065、0.066、0.105、0.045 GHz,如图 16 所示,通过中心频率为 8.772 GHz 的电磁波可以检测裂缝位置。

表 5 不同裂缝位置辨识效果对比
Table 5 Comparison of identification effect of different crack locations

裂缝模型	可以辨识 /段	容易辨识 /段	极易辨识 /段	公有中心频率 带宽/MHz
M11	21	13	8	65
M31	22	12	8	66
M32	30	24	18	105
M33	16	7	3	45

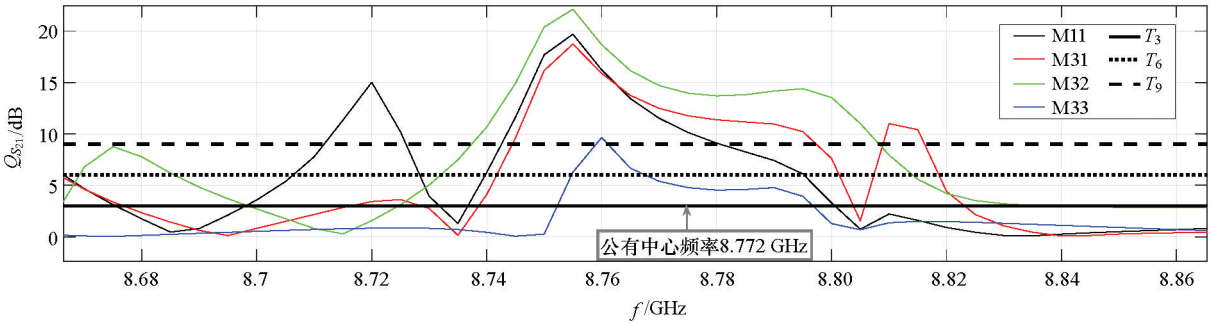


图 16 不同位置裂缝公有中心频率附近的特征频带
Fig.16 Characteristic frequency band near common center frequency of crack with different locations

4 结论

本文通过在混凝土中嵌入一对钢筋环状天线并由天线向混凝土内部发射电磁波进行建模仿真,通过改变裂缝厚度、裂缝角度、裂缝位置来分析 S_{21} 幅值参数在 5~10 GHz 范围内的数据规律,探究混凝土内钢筋作为传感器检测裂缝的新方法,由仿真结果可以得出:

- 1) 5~10 GHz 范围内,可以以钢筋作为天线,通过分析钢筋天线对的 S_{21} 幅值参数,可以辨识混凝土内裂缝。
- 2) 裂缝的厚度、角度、位置的改变均会导致 S_{21} 参数幅值上的改变,从而影响特征频带的数量、带宽、中心频率。5~10 GHz 范围内,通过 S_{21} 幅值参数,可以计算厚度、角度、位置的裂缝参数。
- 3) 通过本文的计算模型,发现如下规律:特征频率为 7.165 GHz 时,裂缝厚度越厚,带宽越大;特征频率为 8.569 GHz 时,裂缝角度越大,带宽越大。

本文采用电磁波仿真软件,探究了应用钢筋作为混凝土内置天线的混凝土裂缝状的电磁波传播的规律,发现通过钢筋天线对 S_{21} 幅值分析可以判断混凝土裂缝状态,有望实现一种无需额外装配传感器,且其寿命与结构寿命等长的混凝土裂缝检测变革性传感方法。但这种传感方法对于实际工程应用,还需要对基于钢筋天线的混凝土裂缝传感进行充分的理论分析与实验验证。

参考文献 (References):

[1] 杨必胜.车载探地雷达地下目标实时探测法[J].测绘学报, 2020,49(7):874-883.
Yang B S. Real time detection of underground targets by vehicle borne ground penetrating radar [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2020, 49(7): 874-883.
[2] 郭炜.水工大体积混凝土裂缝检测[J].水利水电快报,2007,28

(19):27-28.
Guo W. Crack detection of hydraulic mass concrete [J]. Water Conservancy and Hydropower News, 2007, 28(19): 27-28.
[3] 胡群芳.三维探地雷达在城市市政管线渗漏探测中的应用[J].同济大学学报,2020,48(7):972-981.
Hu Q F. Application of 3D ground penetrating radar in leakage detection of municipal pipelines [J]. Journal of Tongji University, 2020, 48(7): 972-981.
[4] 梁飞宇.应用电磁波探测混凝土管道的空洞缺陷[D].天津:河北工业大学,2013.
Liang F Y. Application of electromagnetic wave to detect cavity defects in concrete pipes [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2013.
[5] 刘宗辉,刘毛毛,周东,等.基于探地雷达属性分析的典型岩溶不良地质识别方法[J].岩土力学,2019,48(8):3282-3290.
Liu Z H, Liu M M, Zhou D, et al. Identification method of typical karst unfavorable geology based on GPR attribute analysis [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 48(8): 3282-3290.
[6] Jr J A D R, Castro D L D, Jesus T E S D, et al. Characterization of collapsed paleocave systems using GPR attributes [J]. Journal of Applied Geophysics, 2014, 103(21): 43-56.
[7] 韩波,丁亮,陈勇.探地雷达无损检测方法评述[J].黑龙江大学自然科学学报,2011,28(5):608-617.
Han B, Ding L, Chen Y. Review of ground penetrating radar non-destructive testing methods [J]. Journal of Natural Science of Heilongjiang University, 2011, 28(5): 608-617.
[8] 丁君.工程电磁场与电磁波(第二版)[M].北京:高等教育出版社,2019.
Ding J. Engineering electromagnetic field and electromagnetic wave (second edition) [M]. Beijing: Higher Education Press, 2019.
[9] 何继善.大深度高精度广域电磁勘探理论与技术[J].中国有色金属学报,2019,29(9):1809-1816.
He J S. Theory and technology of wide field electromagnetic method [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29(9): 1809-1816.
[10] 钟顺时.天线理论与技术(第二版)[M].北京:电子工业出版社,2015.
Zhong S S. Antenna theory and technology (second edition) [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2015.
[11] 肖小汀.基于探地雷达的混凝土无损检测方法研究[D].广州:华南理工大学,2013.

Xiao X T. Research on concrete nondestructive testing method based on ground penetrating radar [D]. Guangzhou: South China University of Science and Engineering, 2013.

[12] 贺文根,严家斌,李俊杰.位移电流及反射与折射对高频电磁波探测深度的影响[J].工程地球物理学报,2013,10(4):539-544.

He W G, Yan J B, Li J J. Influence of displacement current, reflection and refraction on detection depth of high frequency electromagnetic wave [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2013, 10(4): 539-544.

[13] 周道传,朱海堂.电磁波在混凝土材料表面的透射率研究[J].功能材料,2011,42(4):635-638.

Zhou D C, Zhu H T. Study on transmission of electromagnetic wave on concrete surface [J]. Functional Materials, 2011, 42(4): 635-638.

[14] Navid R, Deyasini M, Bruce C. Electromagnetic energy and data transfer in biological tissues using loop antennas [J]. Procedia Computer Science, 2013, 19(4): 908-913.

[15] 徐锐敏.微波技术基础(第二版)[M].北京:科学出版社,2020.

Xu R M. Fundamentals of microwave technology (second edition) [M]. Beijing: Science Press, 2020.

[16] 马文健.宽载波频率大带宽超短波射频电路关键技术与验证[D].成都:电子科技大学,2017.

Ma W J. Research and verification of key technologies of wide carrier frequency and large bandwidth ultra short wave radio frequency circuit [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2017.

[17] 彭宇,王蕾,郭福强,等.一种超宽带小型化探地雷达天线的设计[J].物探与化探,2014,38(4):750-753.

Peng Y, Wang L, Guo F Q, et al. Design of a miniaturized UWB GPR antenna [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2014, 38(4): 750-753.

[18] 刘庆想,李相强,袁成卫.高功率双层径向螺旋阵列天线理论分析与数值模拟[J].电子学报,2005,12(1):2231-2234.

Liu Q X, Li X Q, Yuan C W. Theoretical analysis and numerical simulation of high power double layer radial helix array antenna [J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 12(1): 2231-2234.

Impacts of cracks in concrete on characteristic parameters of electromagnetic wave transmission

DING Xiao¹, MO Si-Te¹, LI Bi-Xiong², HUANG Hua¹

(1. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: The occurrence and development characteristics of concrete cracks are important characterization parameters of concrete health. Given that steel reinforcement is the inherent structure of concrete, this paper proposes a method for monitoring cracks in concrete using steel reinforcement antennae. In this method, a steel reinforcement transmitting and receiving antenna pair embedded in concrete is set, and the cracks in concrete are detected according to the amplitude of the antenna pair's parameter S_{21} that can reflect electromagnetic wave propagation. To this end, a simulation model based on the CST Studio Suite software was constructed to calculate the amplitude of S_{21} using the software. The relationship between the amplitude of S_{21} and the crack state was analyzed. The results show that the state of cracks in concrete has a significant impact on the amplitude of S_{21} , and thus the cracks can be detected according to the characteristics of the amplitude of S_{21} . The cracks can be identified if the ratio between the amplitude of S_{21} obtained using the models with and without cracks exceeds a certain threshold. Meanwhile, the corresponding frequency band that can identify the cracks is defined as the characteristic frequency band of cracks. The simulation results show that the amplitude of S_{21} significantly changes with different crack thickness, crack angles, and crack positions. Therefore, the concrete cracks and their characteristics can be judged from the amplitude of S_{21} by setting up a steel reinforcement transmitting and receiving antenna pair in concrete.

Key words: concrete; crack; reinforced antenna; electromagnetic wave; S parameter amplitude

(本文编辑:沈效群)