

# 大应变下贴片天线应变传感器的性能研究

徐康乾<sup>1</sup> 谢丽宇<sup>1,\*</sup> 薛松涛<sup>1,2</sup> 蒋 灿<sup>1</sup> 万国春<sup>3</sup> 张建国<sup>4</sup>

(1. 同济大学结构防灾减灾工程系, 上海 200092; 2. 日本东北工业大学, 工学部建筑学科, 仙台;  
3. 同济大学电子信息工程学院, 上海 201804; 4. 上海城投原水有限公司教育培训中心, 上海 201250)

**摘 要** 基于微波贴片天线的应变传感器近年来在应变监测领域得到了广泛的研究和发展。由于天线特殊的力学性质——其谐振频率与天线的尺寸存在一定关系, 即当天线经历应变时其尺寸发生改变, 进而引起谐振频率的偏移, 可将天线作为应变传感器的传感单元。理论推导和相关试验表明, 在低应变下天线的谐振频率的偏移量与应变呈良好的线性关系, 但在大应变时缺乏研究。通过设计试验将天线粘贴在钢板上进行大应变拉伸, 试验结果显示在发生粘结破坏之前天线的谐振频率与应变同样具有较好的线性关系, 且传感器的灵敏度与初始谐振频率十分接近, 符合理论推导。

**关键词** 贴片天线, 应变传感器, 谐振频率

DOI:10.15935/j.cnki.jggcs.2019.01.008

## Study on the Performance of the Strain Sensor under the Large Strain

XU Kangqian<sup>1</sup> XIE Liyu<sup>1,\*</sup> XUE Songtao<sup>1,2</sup> JIANG Can<sup>1</sup> WAN Guochun<sup>3</sup> ZHANG Jianguo<sup>4</sup>

(1. Department of Disaster Mitigation for Structures, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Nippon Institute of Technology Department of engineering construction, Sendai;

3. Tongji University Department of Electronic Science and Technology, Shanghai 201804, China;

4. Shanghai Investment Raw Water Co., Ltd. Education Training Center, Shanghai 201250, China)

**Abstract** The strain sensor based on microwave patch antenna is presented to monitor structural strain. The resonant frequency of antenna will shift when dimension changes due to strain antenna experience. Taking advantage of this special mechanical property, the antenna can be used as strain sensing unit. Theoretically, the resonant frequency has good linearity with strain, which is validated by experiment under low strain level and lack of research when strain over 0.1%. The experiment by stretching the steel plate on which antenna is attached is conducted. The results indicate that the relationship between resonant frequency and strain remains linear until connection damage, and the sensitivity is fairly close to initial resonant frequency, which is consistent with theory.

**Keywords** patch antenna, strain sensor, resonant frequency

## 0 引 言

建筑、桥梁等重要工程结构在使用荷载和环境作用下随着时间的推移性能逐渐退化, 为了准

确评估结构的恶化, 在过去的几十年中大量的结构健康监测研究得到了发展<sup>[1]</sup>。作为结构健康监测系统关键部分的传感器, 可检测如应变、裂缝和加速度等各参数, 这些参数为结构性能的评估提供了可靠的依据。

收稿日期: 2018-03-10

基金项目: 国家自然科学基金(51478356) 政府间国际科技创新合作重点专项(2016YFE0127600) 中央高校基本科研业务费专项资金资助

作者简介: 徐康乾, 男, 硕士研究生, 主要从事 RFID 传感器研究。Email: xukangqian@tongji.edu.cn

\* 联系作者: 谢丽宇(1978-), 男, 讲师, 硕士生导师, 主要从事结构减隔震与结构健康监测的研究。Email: liyuxie@tongji.edu.cn

在结构构件中,应变状态反映了其工作情况,可依据传感器采集的应变信息对构件的性能进行准确的评估以及对结构的剩余寿命进行合理的预测。电阻应变传感器、弦振式应变传感器和光纤光栅传感器为常见的传统应变传感器。其中电阻式应变传感器是将构件的应变变化转化为自身的电阻变化,通过电路进一步转化为电流或电压信号来反应应变的变化<sup>[2]</sup>,使用最为广泛,性能可靠;弦振式应变传感器利用弦的共振频率与应变的关系进行应变测量<sup>[3]</sup>,稳定性较好,但安装时需将安装块焊接在钢构件表面,增加了安装难度;光纤光栅传感器是基于光纤光栅布拉格波长的调制来获取传感信息<sup>[4]</sup>,抗干扰能力较强,但容易损坏,埋入时需做好封装保护。

在利用上述应变传感器监测应变时,通常需要大量的导线为传感器提供能源以及实现数据的传输,这些导线会增加安装的难度,限制传感器的布置以及提高了监测系统的成本,更为严重的是当结构经历灾害时,传感系统可能会因为引线的损坏导致其失效。为了克服传统传感器存在导线的缺点,许多无线传感器被开发研究<sup>[5]</sup>。这些无线传感器利用传统应变传感单元采集应变信号,将采集的模拟信号通过 D/A 转换器转化为数字信号,利用微处理器存储并处理所采集数据,最后利用天线将数据无线传输给终端。这类无线传感器需要电池为其提供能量,虽然避免了有线带来的麻烦,但当电池损坏或电量不足时传感器不能正常工作,更换电池又需要耗费大量的劳动力,甚至会对结构造成损伤。因此,无线无源传感器的开发研究显得很有必要。

随着学科交叉的兴起,学者们发现了基于电磁原理的无线无源传感器。该类传感器的传感单元当经历应变尺寸发生改变时,谐振频率随之改变并与应变存在一定关系。2002年,Butler等<sup>[6]</sup>提出了一种基于 LC 线圈的应变传感器,当线圈经历应变时其中心区面积和螺线管高度随着改变,进而引起谐振频率的改变。利用同样的原理,Mita等<sup>[7-9]</sup>开发了一种用于检测结构中最大应变的应变计。除了采用 LC 震荡电路外,射频腔和探针也被作为传感单元。2004年,Chuang等<sup>[10-11]</sup>选用圆柱形射频腔作为传感单元,可埋入混凝土中检测其应变,该传感器可探测的有效距离达 10m,但传感器尺寸相对较大。2014年,Ozbey等<sup>[12-13]</sup>选用探针作为传感单元,开发了一

种用于测量混凝土中钢筋应变的传感器,但其信号的穿透性仍有待今后研究。于此同时,学者们开始对即可做传感单元又可做传输单元并且工作在高频段的贴片天线进行研究。2011年,Occhiuzzi等<sup>[14]</sup>设计了一种基于折叠的偶极子天线的应变传感器。2013年,Bai等<sup>[15]</sup>研究了一种采用偶极子天线的应变传感器,当应变超过某一阈值时电路被激活进行信号传输,所以该传感器可用作应变报警器却不能用来监测应变。2010年,Daliri等<sup>[16-17]</sup>基于贴片天线设计了一种应变传感器,它由一个喇叭天线和带有圆形微带贴片的反射面组成,由于喇叭天线的存在,使应变的检测变得极为不方便。2011年,Yi等<sup>[18-19]</sup>开发了一种采用矩形贴片天线的应变传感器,用以检测材料表面的应变。该传感器在 500  $\mu\epsilon$  以下时谐振频率与应变具有很好的线性关系。但在实际结构中,尤其是经历地震作用时,应变可达 10 000  $\mu\epsilon$  的量级,此时天线能否协同工作以及天线谐振频率与应变是否具有良好的线性关系,是本文研究的内容。

## 1 应变传感系统

本文所研究的是基于 2.45 GHz 四分之一波长矩形贴片天线设计的应变传感器。四分之一贴片天线由上辐射贴片、下辐射贴片、匹配线、基板和过孔组成,如图 1 所示。

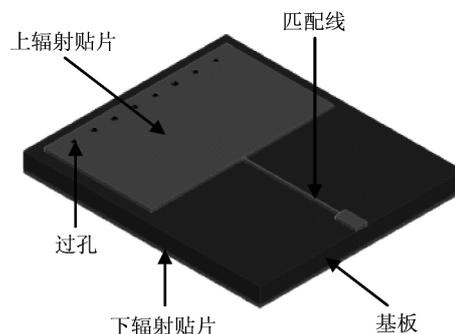


图 1 四分之一波长矩形贴片天线模型

Fig. 1 The model of quarter-wavelength rectangular patch antenna

### 1.1 矩形贴片天线的设计原理

对于四分之一波长矩形贴片天线,其初始谐振频率可由下式近似计算<sup>[20]</sup>

$$f_{R0} = \frac{c}{4(L_1 + 2\Delta L_1)\sqrt{\epsilon_e}} \quad (1)$$

式中:  $f_{R0}$  为初始谐振频率;  $c$  为光速;  $L_1$  为上辐射贴片天线的长度;  $\epsilon_e$  为基板的等效介电常数;  $\Delta L_1$  为考虑介质板效应的补偿介电长度。其中  $\epsilon_e$  不能直接测量,但它可由介质板的相对介电常数  $\epsilon_r$  计算得到

$$\epsilon_e = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{10H}{W_1}\right)^{-\frac{1}{2}} \quad (2)$$

式中:  $H$  为介质板厚度;  $W_1$  为上辐射贴片宽度。

补偿介电长度  $\Delta L_1$  可按式计算:

$$\Delta L_1 = 0.412H \frac{(\epsilon_e + 0.3)(W_1/H + 0.264)}{(\epsilon_e - 0.258)(W_1/H + 0.8)} \quad (3)$$

根据式(1)和式(3)可知,谐振频率  $f_R$  受到上辐射贴片长度  $L_1$  的直接影响,而上辐射贴片宽度  $W_1$  通过影响  $\Delta L_1$  间接对  $f_R$  产生影响。一般  $L_1 \gg \Delta L_1$ ,若忽略  $\Delta L_1$  的影响,当天线在长度方向上经历应变  $\epsilon$  时,贴片天线上辐射贴片的长度将变为  $L_1(1 + \epsilon)$ ,谐振频率  $f_R$  的改变可简化为

$$f_R \approx \frac{c}{4\sqrt{\epsilon_e} L_1(1 + \epsilon)} = \frac{f_{R0}}{1 + \epsilon} \approx f_{R0}(1 - \epsilon) \quad (4)$$

谐振频率  $f_R$  与长度方向应变呈现近似线性关系,斜率为  $-f_{R0}$ 。显然,矩形贴片天线的初始谐振频率越高,应变传感器对应变的灵敏度越高。

### 1.2 矩形贴片天线的设计

根据式(4),为使应变传感器的灵敏度较高,将传感器的初始谐振频率选在约 2.45 GHz,介质板选用 RT-5880,相对介电常数  $\epsilon_r$  为 2.2。介质板的厚度取 0.5 mm,上辐射贴片天线的宽度  $W_1$  主要影响天线的效率,一般推荐的贴片天线实用宽度为

$$W_1 = \frac{c}{2f_{R0}} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}} \quad (5)$$

根据式(5)计算出天线的上辐射贴片宽度为 35 mm。根据式(1) - 式(3),计算得上辐射贴片天线的长度为 20.6 mm。

为保证天线与网络分析仪的同轴线阻抗匹配,在 HFSS™ 中建立贴片天线的 3D 模型,如图 2 所示,通过调节匹配线的尺寸使阻抗匹配达到最优。优化之后天线的具体尺寸如图 3 和表 1 所示。根据表中的参数,依据上式计算出天线的初始谐振频率为 2.413 7 GHz。

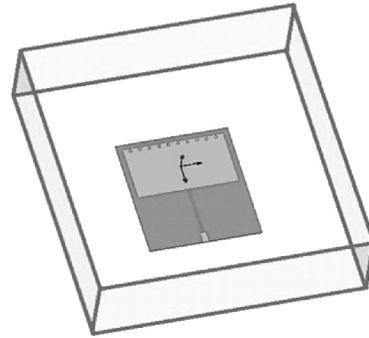


图 2 HFSS™ 中贴片天线 3D 模型

Fig. 2 The 3D model of patch antenna in HFSS™

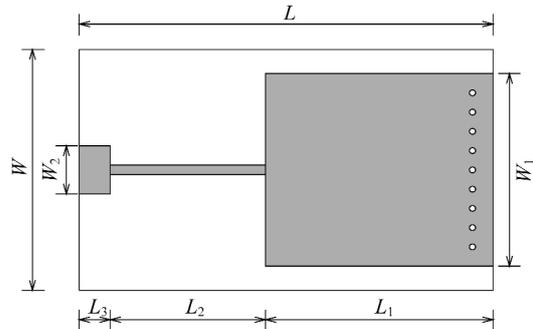


图 3 贴片天线的参数

Fig. 3 The parameters of patch antenna

表 1 贴片天线的参数与尺寸

Table 1 The parameters and dimensions of patch antenna

of patch antenna				mm
$W$	$L$	$H$	$W_1$	
39	45.5	0.5	35	
$W_2$	$L_1$	$L_2$	$L_3$	
2.1	20.6	18.7	4	

### 1.3 谐振频率的测量

定义反射系数为

$$\Gamma(z) = \frac{Z_L - Z_0^*}{Z_L + Z_0} \quad (6)$$

式中:  $\Gamma(z)$  为反射系数;  $Z_L$  为负载阻抗;  $Z_0$  为传输线的特性阻抗,上标“\*”表示共轭。

当  $\Gamma(z) = 0$ , 为行波状态,又称为无反射工作状态,此时传输线负载的阻抗等于传输线特性阻抗  $Z_L = Z_0$ ,即天线阻抗匹配。

计算出传输线的反射系数  $\Gamma$  后,即可计算传输线的回波损耗系数  $S_{11}$ ,即反射功率与入射功率之比的分贝数:

$$S_{11} = 10 \lg \frac{P^-}{P^+} = 10 \lg |\Gamma_L|^2 \quad (7)$$

式中:  $P^-$  为反射功率;  $P^+$  为输入功率。

显然,反射系数越小,回波损耗系数也越小,传输线的传输能力越强。

一般用来检测天线回波损耗系数  $S_{11}$  的设备是矢量网络分析仪,如图4所示,在测量时仪器发出扫频信号,通过输出口送至待测天线,一部分输入信号被反射,未被反射的信号通过待测天线输出,依此计算回波损耗系数  $S_{11}$ 。

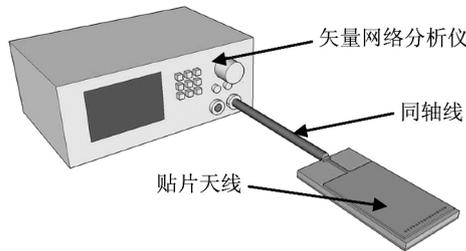


图4 用网络分析仪测量天线示意图

Fig.4 Measurement of resonant frequency of antenna by VNA

测量中,网络分析仪以多种频率发射电磁波,频率不同时,待测天线的反射信号功率不同,回波损耗系数  $S_{11}$  也不同,为频率  $f$  的函数,即

$$S_{11} = S_{11}(f) \quad (8)$$

贴片天线应变传感器根据天线谐振频率来测量应变,谐振频率为天线的最佳工作频率。当天线以谐振频率工作时,天线最接近阻抗匹配状态,由式(6)和式(7)可知,此时回波损耗系数  $S_{11}$  最小,所以

$$\min [S_{11}(f)] = S_{11}(f_R) \quad (9)$$

因此在某一频段范围内所测得的回波损耗系数曲线的最小值点对应天线的谐振频率  $f_R$ 。当天线尺寸改变时,回波损耗曲线随之改变,寻找最小值点即可得谐振频率,如图5所示。

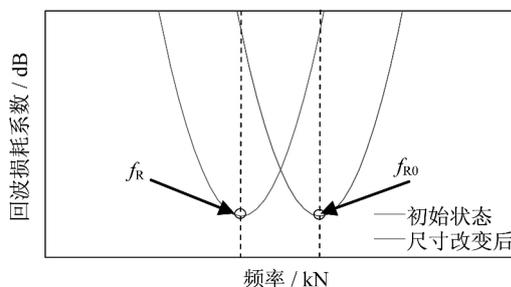


图5 谐振频率及偏移量的测量

Fig.5 Measurement of resonant frequency and its shift

## 2 应变传感器试验

为探究在  $10\,000\ \mu\varepsilon$  量级的大应变下矩形贴

片天线的性能,设计拉伸试验进行研究。

### 2.1 试验器材

选择 Q235 钢作为拉伸材料,试样尺寸选为  $300\text{ mm} \times 80\text{ mm} \times 6\text{ mm}$ ,为一矩形板,保证应力分布的均匀性。

所用拉伸机型号为 WAW-500J,如图6(a)所示,最大拉力为 500 kN,可保证试样被拉伸至所需要的应变。拉伸机夹口宽 90 mm,最大可夹厚度 40 mm,均大于试样尺寸,可均匀传力。

所用应变采集仪型号为 NI PXIe-1078,所用电阻应变片极限拉应变为  $20\,000\ \mu\varepsilon$ 。

所选用矢量网络分析仪如图6(b)所示,扫频范围为  $0 \sim 10\text{ Hz}$ ,可检测贴片天线谐振频率点附近的回波损耗  $S_{11}$  曲线。



(a) 拉伸机

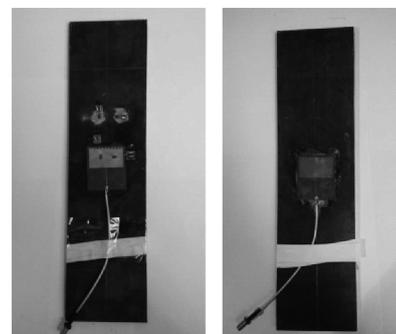
(b) 网络分析仪

图6 试验器材

Fig.6 Experimental setup

### 2.2 试验方案

试验分两组进行,第一组两个试件,第二组一个试件。第一组在钢板上粘贴天线,并在钢板和天线上分别粘贴横向和纵向的电阻应变片,如图7(a)所示;第二组只在钢板上粘贴天线,如图7(b)所示。



(a) 第1组试件

(b) 第2组试件

图7 试验试件

Fig.7 Experimental specimens

第一组天线上的应变片获得天线的应变,与钢板上的应变相对比计算得应变传递效率;分别获得第一组和第二组天线经历应变后的谐振频

率,并相对比探究电阻应变片的存在是否对天线的谐振频率产生影响。

试验加载采用位移加载,加载位移分别为 0.75 mm、1.50 mm、2.25 mm、3.00 mm、4.50 mm、6.00 mm、7.50 mm 和 9.00 mm。

### 3 试验结果分析及讨论

#### 3.1 应变传递效率

天线谐振频率的漂移量取决于上辐射贴片的变形,由于基板和粘结胶水的剪力滞后效应以及粘贴天线导致的刚度改变,致使天线上辐射贴片的应变与试样的应变不一致,定义传递效率

$$\eta = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_s} \quad (10)$$

式中:  $\eta$  为传递效率;  $\varepsilon_c$  为上辐射贴片的应变;  $\varepsilon_s$  为试样应变。

第一组试验所测传递效率曲线如图 8 所示,其中

$$\text{名义应变} = \frac{\text{加载位移}}{\text{试件原长}} \quad (11)$$

可见随着荷载的增加,传递效率逐渐减小。在名义应变为 1.2% 之前时,传递效率从 90% 平稳减小至 76%。在名义应变为 1.4% 之后,传递效率急剧减小,此时说明天线与钢板的连接已脱开。在此之间,天线与钢板的连接已变得不可靠。

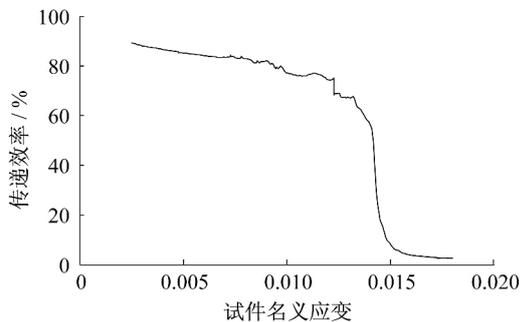


图 8 名义应变-传递效率关系图

Fig. 8 The curve of nominal strain and transfer efficiency

#### 3.2 谐振频率与应变关系

每级加载完成后,利用网络分析仪记录天线的  $S_{11}$  曲线 10 次,按式(12)取平均值。同时为减少环境噪声的影响,选取  $S_{11}$  曲线最小值附近的一小段,采用四次函数进行拟合,并选取局部拟合曲线的最小值点作为天线在该级荷载下的谐振频率

点,如图 9 所示<sup>[21]</sup>。

$$S_{11}(f) = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} S_{11,i}(f) \quad (12)$$

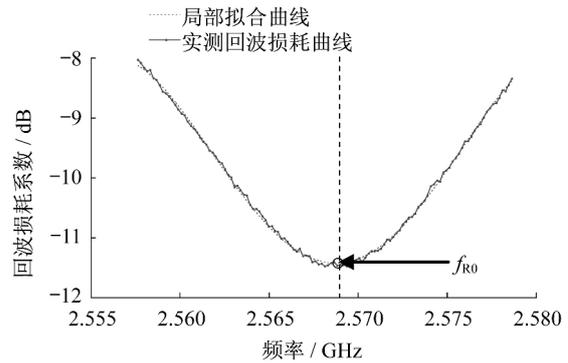


图 9 谐振频率的选取

Fig. 9 Extracting of resonant frequency

各级荷载下谐振频率与名义应变的关系如图 10 所示,加载位移为 3.00 mm,名义应变为 1% 之前,随着位移的增加谐振频率逐渐减小,此时天线与钢板一起协同变形。在名义应变 1% 之后,与 4.1 中传递效率相对应,此时天线与钢板逐渐脱开,之前的拉伸变形开始回缩,谐振频率相对应增大。

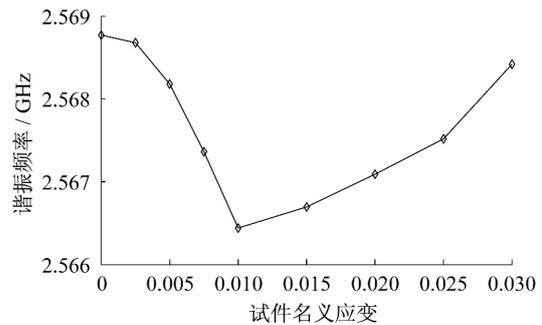


图 10 名义应变-谐振频率关系图

Fig. 10 The curve of nominal strain and resonant frequency

选取天线与试样未脱开时的谐振频率与天线上辐射贴片的应变进行直线拟合,见图 11 与表 2。第二组试件的应变选用第一组两个试件应变的平均值。

在天线未与试件脱开前,谐振频率与应变具有较好的线性关系,且直线斜率即传感器灵敏度大约等于初始谐振频率,与理论推导相符。

#### 3.3 应变片对天线工作的影响

电阻应变片通电产生的磁场可能会对天线造成影响,同一加载级数下有应变片和无应变片的实测回波损耗曲线与局部拟合曲线如图 12 所示。

可见,无论应变片是否存在,所测回波损耗曲线的波动都较小,并且结合 2.2 的结论可知,应变片的存在对天线的影

响是可以忽略的。可靠的连接时,天线传感器的量程会继续增加,线性关系也值得进一步研究。因此,探寻一种更可靠的连接方式对天线传感器的应用有着重要的意义。

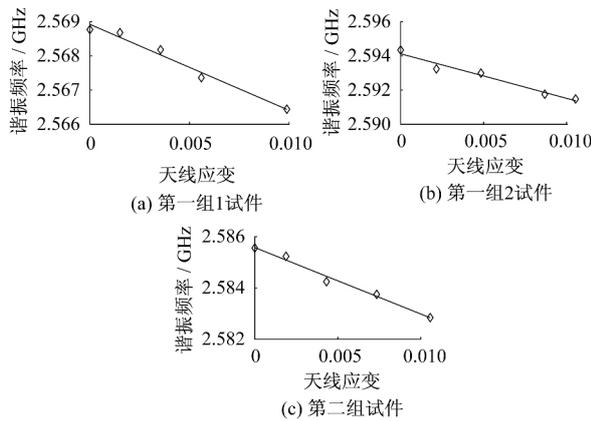


图 11 应变-谐振频率直线拟合

Fig. 11 The fitted line of strain and resonant frequency

表 2 应变-谐振频率直线拟合参数

Table 2 The parameters of fitted line of strain and resonant frequency

试件	初始谐振频率/ GHz	斜率/ GHz	相关系数 R <sup>2</sup>
第一组 1 试件	2.57	-2.52	0.9772
第一组 2 试件	2.59	-2.61	0.9642
第二组试件	2.59	-2.59	0.9850

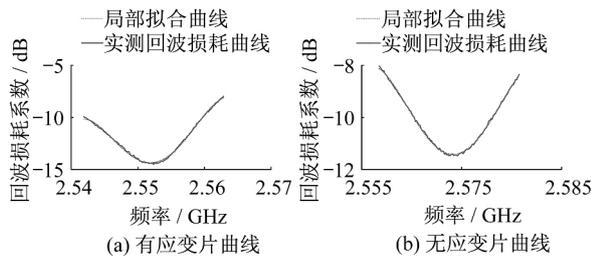


图 12 有无应变片的曲线对比

Fig. 12 The comparison of curves with and without strain gauges

### 4 结论

本篇论文介绍了四分之一贴片天线传感器的设计及试验。在 500 με 下该类天线已被证实谐振频率与应变具有很好的线性关系。当所测应变继续增加时,谐振频率与应变仍具有较好的线性关系,直至天线与试样发生粘结破坏,此时天线应变约为 10 000 με。可见,影响贴片天线传感器量程的原因是粘结强度,当天线与所测结构有着更

### 参考文献

[1] Sohn H ,Farrar C R ,Hemez F M ,et al. A review of structural health monitoring literature: 1996-2001 [J]. Data Acquisition 2004 ,1a-13976-m.

[2] 尹福炎. 电阻应变计技术六十年(一) 电阻应变计的由来、发展及展望 [J]. 传感器世界 ,1998( 8) : 27-32.

Yin Fuyan. Sixty years of electric resistance strain gage technique ( I) : The origin ,development and prospect of electric resistance strain gage [J]. Sensor World ,1998( 8) : 27-32. ( in Chinese)

[3] 张慎伟 楼昕 张其林,等. 钢结构施工过程跟踪监测技术与工程实例分析 [J]. 施工技术 ,2008 ,37( 3) : 62-64.

Zhang Shenwei ,Lou Xin ,Zhang Qilin ,et al. Tracking monitoring technology of steel structure construction process and its application [J]. Construction Technology 2008 ,37( 3) : 62-64. ( in Chinese)

[4] 南秋明. 光纤光栅应变传感器的研制及应用 [Z]. 武汉: 武汉理工大学 2003.

Nan Qiuming. Study and application of fiber bragg gratings strain sensor [Z]. Wuhan: Wuhan University of Technology 2003. ( in Chinese)

[5] Lynch J P. A Summary review of wireless sensors and sensor networks for structural health monitoring [J]. Shock & Vibration Digest 2006 ,38( 2) : 91-128.

[6] Butler J C ,Vigliotti A J ,Verdi F W ,et al. Wireless ,passive ,resonant-circuit ,inductively coupled ,inductive strain sensor [J]. Sensors & Actuators A Physical 2002 ,102( 1-2) : 61-66.

[7] Mita A ,Takahira S. Health monitoring of smart structures using damage index sensors 2002 [C]. 2002ER.

[8] Mita A ,Takhira S. A smart sensor using a mechanical memory for structural health monitoring of a damage-controlled building [J]. Smart Materials & Structures , 2003 ,12( 12) : 204-209.

[9] Takahira S. Damage Index Sensor for Smart Structures [J]. Structural Engineering & Mechanics 2004 ,17( 3-4) : 331-346.

[10] Chuang J ,Thomson D J. Wireless strain sensor based on resonant RF cavities 2004 [C]. 2004ER.

[11] Thomson D J ,Card D ,Bridges G E. RF Cavity Passive

- Wireless Sensors With Time-Domain Gating-Based Interrogation for SHM of Civil Structures [J]. *IEEE Sensors Journal* 2009 9(11): 1430-1438.
- [12] Ozbey B ,Demir H V ,Kurc O ,et al. Wireless measurement of elastic and plastic deformation by a metamaterial-based sensor [J]. *Sensors* , 2014 , 14 ( 10 ) : 19609-19621.
- [13] Burak O ,Erturk V B ,Volkan D H ,et al. A Wireless Passive Sensing System for Displacement/Strain Measurement in Reinforced Concrete Members [J]. *Sensors* 2016 ,16(4) :1-17.
- [14] Occhiuzzi C ,Paggi C ,Marrocco G. Passive RFID Strain-Sensor Based on Meander-Line Antennas [J]. *IEEE Transactions on Antennas & Propagation* 2011 , 59(12) : 4836-4840.
- [15] Bai L. RFID Sensor-driven structural condition monitoring in integrated building information modeling environment [J]. *Dissertations & Theses-Gradworks* , 2013.
- [16] Daliri A ,Galehdar A ,John S ,et al. Circular microstrip patch antenna strain sensor for wireless structural health monitoring 2010 [C]. 2010ER.
- [17] Daliri A ,Galehdar A ,John S ,et al. Wireless strain measurement using circular microstrip patch antennas [J]. *Sensors & Actuators A Physical* 2012 ,184(3) : 86-92.
- [18] Xiaohua Y ,Terence W ,Yang W ,et al. Passive wireless smart-skin sensor using RFID-based folded patch antennas [J]. *International Journal of Smart & Nano Materials* 2011 2(1) :22-38.
- [19] Yi Xiaohua ,Cho Chunhee ,Cooper James ,et al. Passive wireless antenna sensor for strain and crack sensing electromagnetic modeling ,simulation ,and testing [J]. *Smart Materials & Structures* , 2013 , 22 ( 8 ) : 85009.
- [20] 鲍尔. 微带天线 [M]. 成都: 电子工业出版社 ,1984. Bauer. *Microstrip Antennas* [M]. Chengdu: Publishing House of Electronics Industry ,1984. ( in Chinese)
- [21] 蒋灿. 基于微波贴片天线的应变传感器研究 [D]. 上海: 同济大学 2017. Jiang Can. A Research of strain sensor based on microwave folded patch antenna [D]. Shanghai: Tongji University 2017. ( in Chinese)