

文章编号: 2095-4980(2019)04-0621-06

温度和机械弯曲引起的同轴电缆相位变化特性

戈 弋, 黄 华, 袁 欢

(中国工程物理研究院 应用电子学研究所 高功率微波技术重点实验室, 四川 绵阳 621999)

摘 要: 对微波相位敏感的电子系统, 要求信号在电缆中传输时由环境温度变化和线缆机械应力作用引起的相位变化较小, 以确保传输信号较低的信号畸变。在 $-20\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内和 $50\sim 200\text{ mm}$ 静态机械弯曲影响下对不同结构的同轴电缆传输相位变化特性进行了理论分析并开展实验验证, 得到了2种常用同轴电缆传输相位随温度和机械弯曲变化的灵敏度。温度在 $0\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 电缆传输相移突然增大; 静态机械弯曲时, 弯曲半径由 50 mm 增大至 200 mm 时, 电缆传输相移可减小一半。在同轴电缆的选择和使用环境的确定时需考虑这些因素的影响。

关键词: 同轴电缆; 相位变化特性; 温度; 机械弯曲

中图分类号: TN06

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201904.0621

Phase characteristics of coaxial cable caused by temperature and mechanical bending

GE Yi, HUANG Hua, YUAN Huan

(Key Laboratory of High Power Microwave Technology, Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: In the phase-sensitive electronic system, it requires steady phase against environment temperature and mechanical deformation to ensure the low distortion of signal. Phase characteristics of coaxial cable with different structures are theoretically analyzed and experimentally verified in the temperature range of $-20\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ and static mechanical bending radius range of $50\sim 200\text{ mm}$, and the phase sensitivity change with temperature and mechanical bending of two common coaxial cables is obtained. When the temperature is in $0\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, the phase shift of the cable will suddenly increase. When the bending radius increases from 50 to 200 mm under static mechanical bending, the phase shift of the cable will be reduced by half. The influence of these factors should be taken into account when selecting coaxial cable and determining the application environment.

Keywords: coaxial cable; phase characteristics; temperature; mechanical bending

稳相同轴电缆是相位特性保持稳定不变的特种同轴电缆, 在对微波相位稳定度要求较高的电子系统中有广泛应用, 要求由环境温度变化和线缆机械应力作用变化所引起的电缆相位变化较小, 以确保传输信号较低的信号畸变。例如在高功率微波(High Power Microwave, HPM)器件研究中, 天馈和某些系统应用对 HPM 源的微波输出要求输出微波保持稳定、满足系统的相位值要求。因此配备了链路相位校正系统, 包含相位控制和相位测试^[1-3]两部分, 根据测试相位值反馈至相位控制系统, 使输出达到应用要求。但在实际环境中, 同轴电缆会因为布局影响而弯曲或碰撞; 系统设备发热较大, 空调系统不能将电缆维持在理想工作温度。

从实验室经验知道, 同轴电缆碰撞和弯曲都会导致相位和幅度的传输改变, 因此需要控制机械弯曲。同轴电缆通常使用聚四氟乙烯作为内外导体间的介质材料, 它在室温附近会发生物质相变, 热膨胀系数随之上升, 被称为“特氟龙膝盖”^[4]; 会在几度的环境温度变化下产生不期望的相位漂移, 环境温度的漂移会引起电缆传输相位的严重改变。通常使用“响应-隔离”方法^[4]或量化电缆引起的相位幅度误差^[5]等软件解决方案对系统进行校准。

多数情况下可以通过软件算法减小电缆带来的幅度相位影响, 但在需要运动和温度无法严格控制的系统中, 电缆性能可能降低到无法通过软件修正的程度^[6]。因此有必要研究温度和机械弯曲对电缆的传输相位影响, 给出

电缆应用的环境限制。本文通过理论分析,得到同轴电缆随外界环境改变的相位变化关系;然后实测测量温度改变和机械弯曲造成的同轴电缆传输相位改变,与理论值对比,验证理论分析;最后给出系统的结构布局和内部温度控制要求。

1 同轴电缆传输相位变化的原理

1.1 常用微波同轴电缆的结构

常用的微波同轴电缆一般由内导体、绝缘介质层、绕包结构、外导体和外层保护套构成,用于传输电磁波,是电子系统中必不可少的组件之一^[7]。常见的微波同轴电缆结构^[8]如图1所示,图1(a):绝缘介质层、镀银铜带缠绕、镀银铜丝编织结构;图1(b):绝缘介质层、镀银铜扁线编织、复合铝塑模绕包、镀银铜线编织结构。2种结构的区别在于图1(b)的绝缘层和外导体之间加入一层镀银铜扁线编织结构,可以起到更好的屏蔽效果和加强电缆结构,减少相对位移的作用。

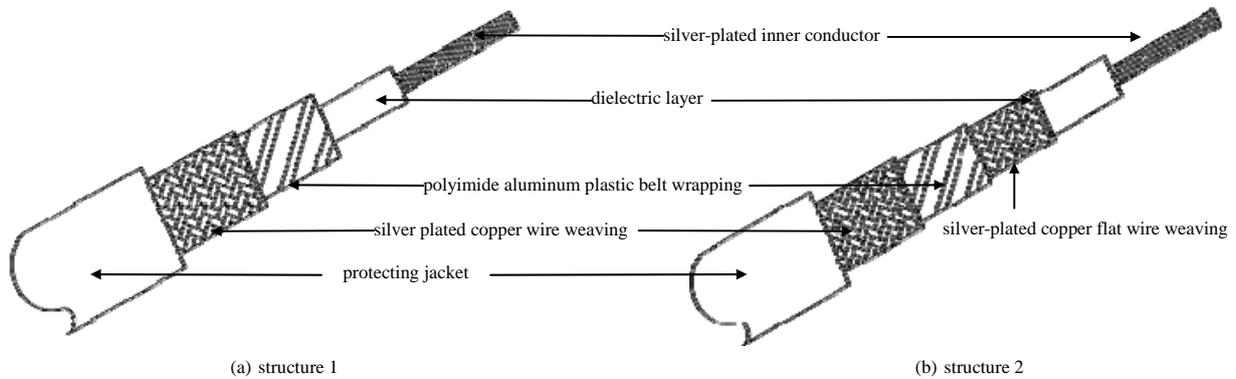


Fig.1 Structure diagram of coaxial cable
图1 同轴电缆结构示意图

1.2 微波电缆相位变化的原理分析

根据传输线理论^[9],电磁波的传播常数 γ 的虚部 β 表征单位长度行波相位滞后的弧度数,称为相移常数。在微波低耗传输线条件下,相移常数可简化为:

$$\beta = \omega\sqrt{LC} \quad (1)$$

式中: ω 为角频率,单位为rad/s; L 为传输线单位长度的串联电感,单位为H/m; C 为传输线单位长度的并联电容,单位为F/m。

在射频条件下,微波在同轴电缆中传输的相移量可表示为^[9]:

$$\phi = \beta l = l\omega\sqrt{LC} = 1.2lf\sqrt{\epsilon_c} = 1.2lf/V_r \quad (2)$$

式中, ϕ 为相移量,单位为 $^\circ$; f 为频率,单位为GHz; l 为电缆的长度,单位为m; ϵ_c 为等效相对介电常数; V_r 为电缆的速比,即信号沿电缆传输速度与光速之比。可以看出,电缆的相移常数与电缆尺寸无关,仅取决于电缆中使用的介质,而且随频率升高而成正比增大。

在外界条件(温度、机械应力等)变化的条件下,同轴电缆的等效相对介电常数和长度会产生变化,因此会引起所传输的主频信号相位相对变化。根据式(2),电缆处于初始状态时的相位可表示为:

$$\phi_0 = \beta_0 l_0 = 1.2l_0 f \sqrt{\epsilon_{c0}} \quad (3)$$

当外界条件相对初始状态变化 x 后,相位 ϕ_x 可表示为:

$$\phi_x = \beta_x l_x = 1.2(l_0 + \Delta l_x) f \sqrt{\epsilon_{c0} + \Delta \epsilon_{cx}} \quad (4)$$

对式(2)求导得

$$\frac{d\phi}{dx} = 1.2f \frac{d(l\sqrt{\epsilon_c})}{dx} = 1.2f \left(\sqrt{\epsilon_c} \frac{dl}{dx} + \frac{l}{2\sqrt{\epsilon_c}} \frac{d\epsilon_c}{dx} \right) \quad (5)$$

$$\frac{1}{\phi} \frac{d\phi}{dx} = \frac{1}{l} \frac{dl}{dx} + \frac{1}{2\epsilon_c} \frac{d\epsilon_c}{dx} \quad (6)$$

因此,电缆的相位 ϕ 随外界环境 x 变化的关系可表示为:

$$\Delta\phi_x = \left(\frac{\Delta l_x}{l} + \frac{\Delta\epsilon_{ex}}{2\epsilon_c} \right) \phi_0 \tag{7}$$

1.3 温度变化引起微波电缆的相位变化

当外界温度发生改变时, 电缆的相位变化主要取决于温度变化引起的电缆机械长度变化 Δl_T 和绝缘介质的等效相对介电常数变化 $\Delta\epsilon_{eT}$, 根据式(4), 可以得到当外界温度相对初始温度变化 T 后, 相位 ϕ_T 为:

$$\phi_T = 1.2(l_0 + \Delta l_T) f \sqrt{\epsilon_{e0} + \Delta\epsilon_{eT}} \tag{8}$$

同轴电缆常用绝缘介质为聚乙烯(Polyethylene, PE)、聚全氟乙丙烯(Fluorinated Ethylene Propylene, FEP)和聚四氟乙烯(Poly Tetra Fluoroethylene, PTFE), 或者其发泡填充物, 其等效介电常数和线性膨胀系数值^[10]如表 1 所示。

表 1 常用介质材料性能参数表
Table 1 Parameters of common dielectric materials

dielectric materials	effective permittivity	dielectric loss angle tangent/ 10^{-4}	temperature class/ $^{\circ}\text{C}$	linear thermal expansion coefficient/ $(10^{-4} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1})$
PE	2.28-2.35	2-5	-55-85	1.10-1.30
physically foamed PE	1.20-1.30	<1	-55-85	1.10-1.30
FEP	2.10	<2	-65-200	0.80-1.05
PTFE	2.10	<2	-65-250	1.0
microcellular PTFE	1.45-1.65	<1	-65-250	1.0

其中微孔聚四氟乙烯具有介电常数低、介质损耗角正切小、耐高温及线膨胀系数低等特点^[8,11], 其等效相对介电常数随温度升高而减小, 而随电缆的机械长度温度升高而增大, 选用适当的材料和电缆结构可以使电缆线伸胀 Δl 与介电常数变量 $\Delta\epsilon$ 正负(或者负正)相互抵消, 使电缆相位随温度变化降到最小。在理想情况下, $(l_0 + \Delta l_T) \sqrt{\epsilon_{e0} + \Delta\epsilon_{eT}} = l_0 \sqrt{\epsilon_{e0}}$ 时, 可以使电缆相位变化为零。

聚乙烯和聚四氟乙烯的介电常数随温度变化特性曲线^[7,12]如图 2 所示。在 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右, 聚四氟乙烯的介电常数有一个相对较大的变化^[4], 且在 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下介电常数减小率大于 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上, 因此可以预测, 这些特性会反映在电缆相位变化上。

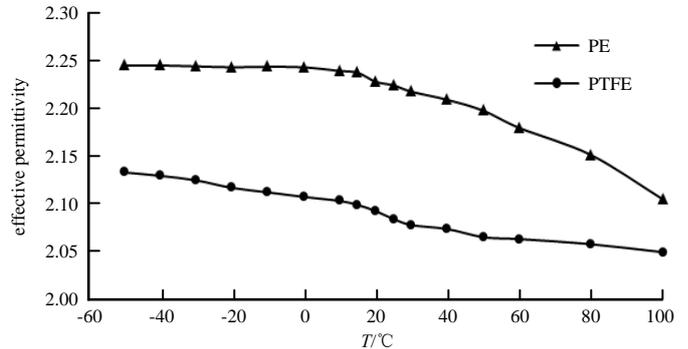


Fig.2 Effective permittivity-temperature curves of dielectric materials
图 2 绝缘介质介电常数随温度变化曲线

1.4 机械弯曲引起的同轴电缆传输相位变化

电缆受到机械力作用时, 可能产生挤压、拉伸、弯曲和扭转等情况, 其相位变化原理分析也非常复杂^[13]。下面从最常见的弯曲变化来分析其对相位稳定的影响。

电缆相位变化主要取决于机械长度变化率以及等效介电常数变化率。当电缆受机械力弯曲时, 相位变化主要由机械长度变化引起, 根据式(7)得

$$\Delta\phi = \frac{\Delta l}{l} \phi_0 \tag{9}$$

同轴电缆弯曲时, 由于各部件所处的弯曲半径不等, 导致电缆外侧受拉伸, 而电缆内侧受挤压, 从而导致机械长度变化, 如图 3 所示。

当理想状态(结构非常紧密, 不会发生绝缘介质层的相对位移)的同轴电缆弯曲时, 外导体外侧最大伸长长度 Δl , 可表示为^[14]:

$$\Delta l = \frac{2r\theta}{1 + \frac{2r}{D}} \tag{10}$$

式中: r 为电缆的弯曲半径; D 为电缆直径; θ 为弯曲角。

弯曲引起的长度变化 Δl 与电缆自身粗细(绝缘直径 D)、弯曲半径 r 、弯曲长度 l 有关。电缆越粗, 弯曲半径越小, 弯曲角越大, 则电缆弯曲长度变化越大, 相位变化也越大。上述分析是在电缆结构十分紧密, 弯曲时内外

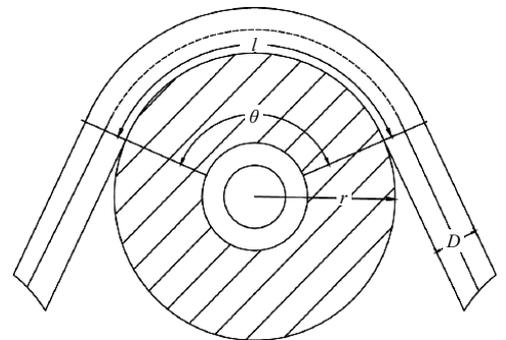


Fig.3 Diagram of length variation caused by the bending of coaxial cable
图 3 同轴电缆弯曲引起的长度变化示意图

导体、绝缘均不发生相对位移的理想状态下进行的。在实际的电缆弯曲时，内外导体、绝缘之间肯定会有相对位移，从而引起电缆相位发生更大的变化。

2 同轴电缆传输相位变化的实验研究

2.1 温度引起的同轴电缆相位变化实验

实验选择相同长度(6 m)的稳相电缆和普通电缆，内外导体间均有绕包结构。在温控箱内进行实验，箱内温度从 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 变化至 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，步长为 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，箱内温度改变后维持 20 min ，实验布局如图4所示。每根电缆进行3次温度循环^[15]，测试频率为 2.88 GHz ，得到的结果如表2所示。可以看到，普通电缆在 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上时，相位比较平缓地先增后减；而温度在 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 附近有超过 $3.5^{\circ}/\text{m}$ 的剧烈相位变化，然后以每 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 变化 $0.6^{\circ}/\text{m}$ 递减。稳相电缆的相位随温度变化趋势与普通电缆一致，但在 $20\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内，电缆相位变化不超过 $0.1^{\circ}/\text{m}$ ，而相位剧烈变化点出现在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。以 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为基准，做出相位随温度变化趋势图，如图5所示。

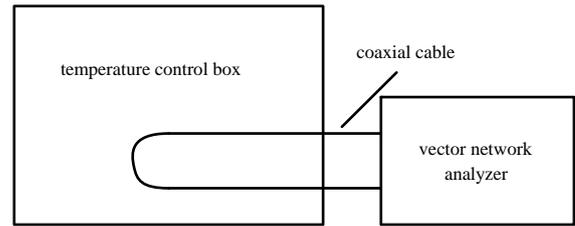


Fig.4 Experiment of phase changing vs. temperature of coaxial cable
图4 温度变化引起同轴电缆相位变化的实验布局图

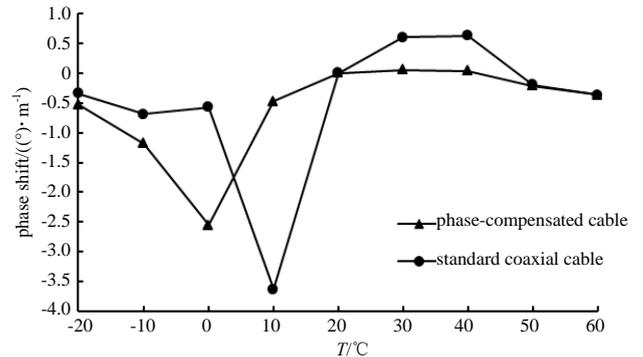


Fig.5 Trends of phase vs. temperature(normalized)
图5 同轴电缆相移量随温度变化趋势图(归一化)

表2 同轴电缆相位随温度变化测试结果

$T/^{\circ}\text{C}$	phase of phase-compensated cable/ $^{\circ}$			phase of standard coaxial cable/ $^{\circ}$		
	loop 1	loop 2	loop 3	loop 1	loop 2	loop 3
-20	77.40	77.68	76.70	44.33	42.17	44.03
-10	80.34	81.21	79.65	46.35	44.73	45.59
0	87.53	88.41	86.46	50.21	49.16	49.73
10	103.30	102.90	102.10	54.38	51.71	53.26
20	105.20	105.70	105.90	74.39	75.11	75.25
30	105.70	106.00	106.20	78.52	78.10	79.08
40	105.80	106.30	106.50	82.75	82.01	82.32
50	104.90	105.10	104.80	81.36	80.98	81.27
60	102.70	103.20	102.30	79.18	78.61	79.22

2.2 机械弯曲引起同轴电缆相位变化的实验研究

将电缆绕成U形连接至矢量网络分析仪两端，记录初始相位，将电缆绕芯轴卷绕 180° ，记录此时相位，然后解绕回到初始位置，反方向绕芯轴卷绕 180° ，记录此时相位。然后改变芯轴的半径，重复上述步骤，分别记录相位^[9]。

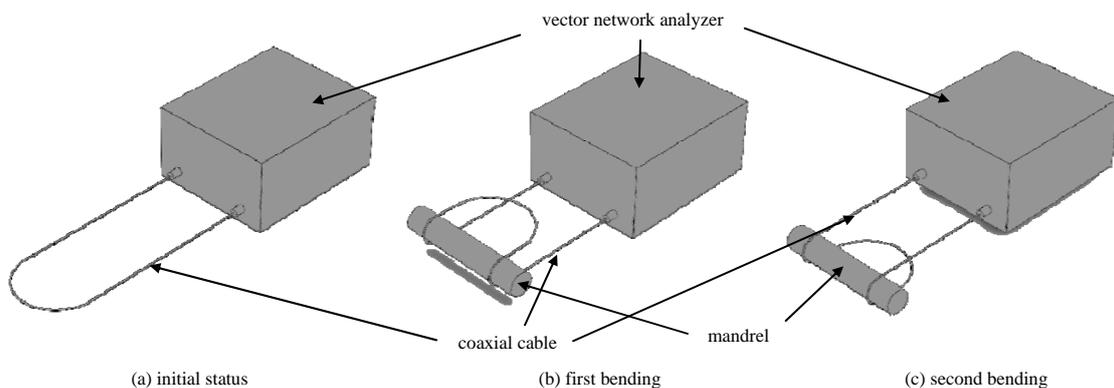


Fig.6 Experiment of phase changing vs. mechanical-bending of coaxial cable
图6 机械弯曲引起同轴电缆相位变化的实验布局图

电缆弯曲得到的相位变化结果如表3所示。可以看出,普通电缆和稳相电缆在弯曲时皆有较大的相位变化,且随着弯曲半径增大,相位变化量减小。

表3 同轴电缆相位随弯曲半径变化测试结果

Table3 Testing results of phase changing vs. mechanical-bending of coaxial cable

bending radius/mm	phase of phase-compensated cable/(°)				phase of standard coaxial cable/(°)			
	(cable diameter 6 mm, minimum bending radius 40 mm)				(cable diameter 10 mm, minimum bending radius 50 mm)			
	initial status	bending 1	bending 2	average phase shifting	initial status	bending 1	bending 2	average phase shifting
50	47.64	51.17	51.82	3.855	100.4	106.1	107.3	6.30
100	47.31	49.62	50.27	2.635	101.1	106.3	105.8	4.95
200	46.94	48.73	49.21	2.030	100.3	103.4	103.9	3.35

根据式(10)得到理论相位变化值,与实际测得的相位变化值比较,结果如图7所示。可以看出,普通电缆和稳相电缆在弯曲时皆有较大的相位变化,且随着弯曲半径增大,相位变化量减小。由于绕包结构不是理想的紧密状态,内外导体、绝缘层间的相对滑动,导致测试值大于理论值。

3 结论

根据同轴电缆传输相位的理论分析和对2种电缆实测,得到了稳相电缆和普通电缆在温度和机械弯曲下传输相位的变化值和变化趋势,对系统结构布局和内部温度控制提出了要求。

同轴电缆在机械弯曲时,会产生较大的相位漂移。在电缆最小弯曲半径时,相位漂移最大;随着弯曲半径增大,相位漂移减小,达到5倍电缆最小静态弯曲半径时,相位漂移可减小约1倍。此时的相位漂移可以满足系统相位容许误差范围。因此,需要使用稳相电缆,且铺设时的弯曲半径需大于电缆最小静态弯曲半径的5倍。

温度对于同轴电缆的影响主要在于电缆介质材料在室温附近的热膨胀系数突变,从而引起传输相位的突变。实验中普通电缆的突变点温度较高,在10℃左右,稳相电缆由于特殊的结构设计和材料选取,将突变点控制在0℃左右,且突变点的相位漂移值比普通电缆低30%以上;在20~40℃环境温度下,稳相电缆的相位变化值仅为普通电缆的10%。由于该电缆所应用的系统在工作时环境温度变化范围为0~35℃,因此传输系统中的被测信号必须使用稳相电缆进行。

参考文献:

[1] 戈弋,黄华,王建忠,等. 高功率微波脉冲的相位测量方法初探[J]. 微波学报, 2014,30(S):494-497. (GE Yi,HUANG Hua,WANG Jianzhong,et al. Initial investigation of phase measurement method of high power microwave pulse[J]. Journal of Microwaves, 2014,30(S):494-497.)

[2] 卓红艳,张家如,邓浩,等. 多路全相位微波数控移相器控制技术[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016,14(3):417-420. (ZHUO Hongyan,ZHANG Jiaru,DENG Hao,et al. Control technology of multiplex all-phase digital phase shifter[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016,14(3):417-420.)

[3] 郭焱华,黄华,罗雄,等. S波段相对论速调管放大器的相位测量[J]. 强激光与粒子束, 2009,21(5):733-736. (GUO Yanhua,HUANG Hua,LUO Xiong,et al. Phase measurement of S-band relativistic klystron amplifier[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2009,21(5):733-736.)

[4] SCHULTZ J W. Focused beam methods:measuring microwave materials in free space[M]. Seattle,USA:Create Space Independent Publishing Platform, 2012.

[5] SCHULTZ J W,SCHULTZ R,MALONEY J,et al. Correction of transmission line induced phase and amplitude errors in reflectivity measurements: U.S. Provisional Patent 20160103197[P]. 2017-02-16.

[6] SCHULTZ J W. Microwave material measurements without cables[J]. Microwave Journal, 2017,60(8):66-78.

[7] 《电线电缆手册》编委会. 电线电缆手册(第2册)[M]. 北京:机械工业出版社, 2014. (Editorial Board of "Handbook of wire and cable". Handbook of wire and cable (volume 2)[M]. Beijing:China Machine Press, 2014.)

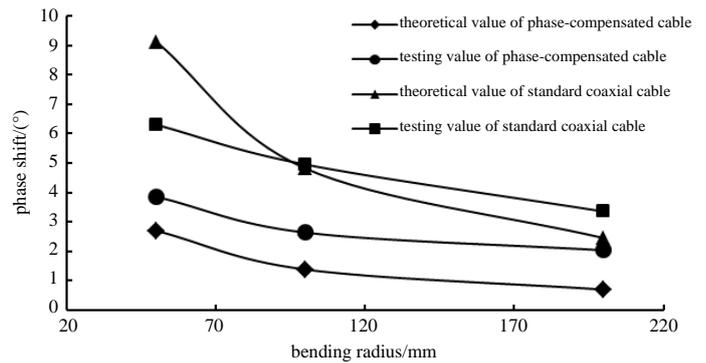
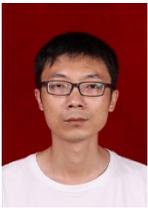


Fig.7 Theoretical and testing values of phase changing vs. mechanical-bending of coaxial cable

图7 同轴电缆相位随弯曲半径变化测试值与理论值

- [8] 汪祥兴. 稳相同轴电缆及其新进展[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 1993(1):5-9. (WANG Xiangxing. Phase-compensated coaxial cable and its new progress[J]. Optical Fiber & Electric Cable and Their Applications, 1993(1):5-9.)
- [9] POZAR D M. Microwave engineering[M]. 4th ed. New York,USA:Hamilton Printing, 2011.
- [10] 姜茂盛,刘美法,余小葵,等. 超低损耗稳相微波同轴电缆的研制[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2015(4):12-15. (JIANG Maosheng,LIU Meifa,YU Xiaokui,et al. Development of an ultra-low-loss stable-phase microwave coaxial cable[J]. Optical Fiber & Electric Cable and Their Applications, 2015(4):12-15.)
- [11] 鞠晨雁,李金明,李炳全,等. 高频低损耗稳相电缆的研制[J]. 电线电缆, 2015(3):16-20. (JU Chenyan,LI Jinming,LI Bingquan,et al. Development of high-frequency low-loss phase-stable cables[J]. Electric Wire and Cable, 2015(3):16-20.)
- [12] 李仰平,周庆,刘翔. 复合聚四氟乙烯耐电弧烧蚀及其介电性能的试验研究[J]. 绝缘材料, 2006,39(2):36-38. (LI Yangping,ZHOU Qing,LIU Xiang. Experimental study on arc ablation resistance and dielectric property of PTFE composites[J]. Insulating Materials, 2006,39(2):36-38.)
- [13] 张磊,靳志杰,高欢. 低损耗稳相电缆的温度稳相及机械稳相研究[J]. 电气技术, 2010(6):91-94. (ZHANG Lei,JIN Zhijie,GAO Huan. Study on temperature stability and mechanical stability of low loss phase stable cable[J]. Electrical Engineering, 2010(6):91-94.)
- [14] 马晖,葛景滂,王惠明,等. 编织型同轴电缆的编织层参数与屏蔽特性的研究[J]. 电线电缆, 1994(4):2-6. (MA Hui, GE Jingpang,WANG Huiming,et al. Study on braiding parameters and shielding characteristics of braided coaxial cable[J]. Electric Wire & Cable, 1994(4):2-6.)
- [15] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. GB/T 17738.1-2013:射频同轴电缆组件 第1部分:总规范 一般要求和试验方法[S]. 北京:中国标准出版社, 2014. (General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China,Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 17738.1-2013:Radio frequency and coaxial cable assemblies—part 1:generic specification—general requirements and test methods[S]. Beijing:Standards Press of China, 2014.)

作者简介:



戈 弋(1983-), 男, 重庆市人, 工程师, 主要研究方向为高功率微波测试技术 .email: geyi@caep.cn.

黄 华(1970-), 男, 重庆市人, 研究员, 主要研究方向为电子束、束波相互作用和高功率微波器件技术.

袁 欢(1990-), 男, 武汉市人, 助理研究员, 主要研究方向为高功率微波器件设计.