文章编号:1004-2474(2016)04-0659-04

基于 BAW 微波延迟线的雷达距离标定模块研制

周文佳[1],田亚睿[2],朱昌安[2],郑泽渔[2]
(西北工业大学 自动化学院 陕西 西安 710100;中国电子科技集团公司第二十六研究所 重庆 400060)

摘　要:针对目前雷达距离零点标定存在的问题,提出了一种基于声体波微波延迟线构成的雷达距离标定模块的方案,以及在设计上降低声体波(BAW)微波延迟线插入损耗,增长延迟时间,扩展工作频率范围的方法,并以此研制了一种能用于多种雷达的通用距离标定模块。实际测试结果表明,基于声体波微波延迟线构成的雷达距离标定模块测试精度高、对场地要求低,可广泛用于雷达生产和维修。

关键词:声体波;距离零点;声传播损耗;衍射损耗;换能器转换损耗
中图分类号:TN384　　**文献标识码**:A

A Radar Distance Calibration Module Based on Bulk Acoustic Wave Microwave Delay Line

ZHOU Wenjia[1], TIAN Yarui[2], ZHU Chang'an[2], ZHENG Zeyu[2]
(1. College of Automation, Northwestern Polytechnical Univercity, Xi'an 710100, China;
2. Sichuan Institute of Piezoelectric & Acoustic Technology, Chongqing 400060, China)

Abstract: Aimed at the existing problem of radar distance null point, a radar distance calibration module scheme based on bulk acoustic wave microwave delay line is presented in this paper, and a method to reduce insertion loss of bulk acoustic wave microwave delay line, enhance delay time, and extend operating frequency range is also proposed, based on which a radar distance calibration module is developed. Actual test results show that this module has high test accuracy and law requirement of fields, which can be widely used in radar production and maintenance.

Key words: bulk acoustic wave; distance null point; sound propagation loss; transducer conversion loss

0　引言

雷达的测距精度是保证雷达完成任务的一项重要技术指标。因此,在雷达出厂前都需要对雷达的距离零点进行精确标定。但是影响雷达测距精度的因素较多[1](如相关电路的元件值发生衰减),当雷达使用或存储一段时间后,原来的距离标定零点会出现漂移,这就需要定期对雷达的距离零点进行检查,并对变化超标的雷达重新进行距离零点标定。另外,当雷达的相关电路因故障维修后(如雷达发射机调制器),距离零点也一定需要重新标定。

传统雷达距离标定方法,广泛采用距离标定铁塔对雷达的距离零点进行标定[2]。使用距离标定铁塔进行距离标定存在以下缺点:

1) 对测试场地要求严格。需要在一个空旷区域内,距离经过严格标定的、高度足够高,且孤立的铁塔。随着城市建设的发展,在雷达生产厂家、测试场地周边使用的标定铁塔,大多都已被城市高层建筑物遮挡而不能使用。

2) 标定精度不高。由于铁塔不是一个理想的点目标,铁塔的结构形状和附近地物的反射对标定的精度都有一定影响[3]。

近年来,人们一直在探索采用微波延迟技术来形成雷达距离目标,对雷达进行距离标定和检查,解决雷达距离标定对场地要求严,测试标定精度不高的问题。其中,声体波(BAW)微波延迟线就是一种具有体积小,质量轻,温度稳定性好及无色散等优点的延迟器件[4-5]。

本项目就是基于 BAW 微波延迟线研发的一种能够用于多种雷达的通用距离标定模块。

1　雷达距离标定模块原理简介

雷达系统的测距原理是:当雷达正常工作时,发

收稿日期:2016-04-27
作者简介:周文佳(1986-),女,山东人,博士生,主要从事无线自组网和雷达组网的研究。

射机工作的大功率微波脉冲信号经天馈线系统发射出去，在空中或地面遇见目标后其反射波被雷达的天馈线系统接收并送到接收机，雷达的信号处理系统根据雷达发射脉冲与目标反射回波的时间间隔，计算出目标的距离[6]。

雷达距离标定模块的原理框图如图 1 所示。其工作原理是：雷达天线对准距离标定模块发射微波，距离标定模块外接的微波喇叭（或利用雷达馈线系统中发射支路已有的定向耦合器，将发射机产生的大功率微波脉冲信号耦合出一部分）接收雷达发射的微波，送入距离标定模块的微波输入口，经环形器送入微波延迟模块进行延迟，延迟后的微波脉冲信号再经过环形器（或直接送到雷达馈线系统中接收支路的定向耦合器）送回给距离标定模块的外接微波喇叭发射出去。

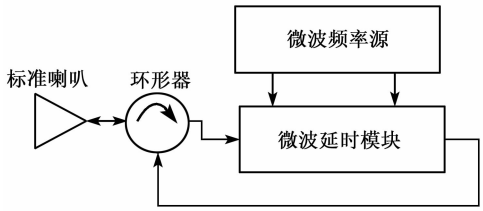

图 1 距离标定模块原理框图

被测试雷达接收距离标定模块发回的，经过延迟后的微波脉冲信号，形成了一个距离固定的模拟目标。

由于距离标定模块与被测试雷达间距是已知的，而距离标定模块产生的微波延迟也是已知的，两者都经过严格标定并保持不变。因此，距离标定模块产生的距离固定的模拟目标信号，可以作为一个标准的标定信号，用于对雷达距离零点进行精确标定和检查。

2 设计与试验

2.1 距离标定模块的设计

由于该雷达距离标定模块工作的频段最高达到 X 波段，标定距离长达数千米，即延迟时间长达几十微秒。对于声体波微波延迟线来说，声传播损耗 L_t 由传声介质的传播损耗因子 α、工作频率 f 和延迟时间 T 决定[7]：

$$L_t \approx \alpha f^2 T \tag{1}$$

由式(1)可估算出在高频、长延迟的情况下，声体波微波延迟线的传播损耗会很大，对于实际应用于距离标定模块是不可接受的。

因此，在标定距离，即延迟时间不能改变的情况下，只能通过降低声体波微波延迟线的工作频率来减小传播损耗。

同时，不同型号的雷达工作频段又差别很大。针对不同工作频率范围的雷达，本文的目标是研发一种能够用于多种雷达的通用距离标定模块，因此，对延时模块采取变频设计方案，微波延时模块原理框图如图 2 所示。一方面通过下变频来降低声体波微波延迟线的工作频率 f_{IF}（下变频器输出频率），延迟信号经过声体波微波延迟线延迟后，由上变频将输出频率恢复到雷达的工作频率范围。另一方面，由下式可知，即

$$f_{RFout} = f_{IF} + f_{LO} \tag{2}$$

$$f_{IF} = f_{RFin} - f_{LO} \tag{3}$$

通过改变微波频率源（本振）的频率 f_{LO} 来调整距离标定装置的工作（输入、输出）频率 f_{RFin} 和 f_{RFout}。

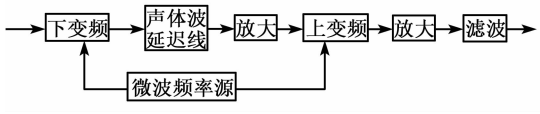

图 2 微波延时模块原理框图

2.2 低损耗 BAW 微波延迟线的基本原理与设计

BAW 微波延迟线是由传声介质及输入、输出端的薄膜换能器与匹配网络构成。其中薄膜换能器由上电极和底电极及氧化锌（ZnO）压电薄膜组成，原理图如图 3 所示。

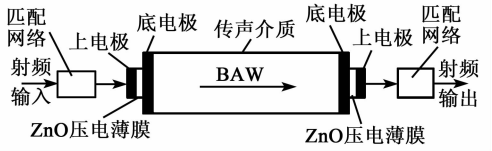

图 3 BAW 微波延迟线结构示意图

BAW 微波延迟线的工作原理是：微波电信号从输入端匹配网络耦合到薄膜换能器，通过 ZnO 压电薄膜的逆压电效应，将电信号转换为声信号。声信号在传声介质内传播，到达输出端的薄膜换能器，通过 ZnO 压电薄膜的压电效应将声信号又转换为电信号，通过输出端匹配网络输出[8]。

BAW 微波延迟线的插入损耗由声传播损耗、转换损耗、衍射损耗、反射损耗和换能器的结合层损耗组成。

由式(1)可知，当工作频率一定时，传输损耗与延迟时间成正比。本文中标定距离要求达到 3 km，对应的延迟时间为 20 μs，因此，设计延迟线时应重点考虑换能器设计，降低换能器转换损耗，从而降低延迟线插入损耗。

在极薄电极和小串联电阻时，换能器转换损耗[9]为

$$L_c = 10\lg \frac{4R_sR_a}{(R_s+R_a)^2+(X_a-\frac{1}{\omega C_0})^2} \tag{4}$$

其中

$$R_a = \left(\frac{4k_t^2}{\pi r_D}\right)\left(\frac{1}{\omega_0 C_0}\right)\times \frac{(r_D/2)^2(1-\cos\theta_0)^2}{(\sin\theta_0)^2+(r_D\cos\theta_0)^2} \tag{5}$$

$$X_a = \left(\frac{4k_t^2}{\pi r_D}\right)\left(\frac{\sin\theta_0}{2\omega_0 C_0}\right)\frac{\left[1+\left(\frac{r_D^2}{2}-1\right)\cos\theta_0\right]}{[(\sin\theta_0)^2+(r_D\cos\theta_0)^2]} \tag{6}$$

$$C_0 = \frac{\varepsilon_0\varepsilon_r S}{t} \tag{7}$$

$$\theta_0 = \pi f/f_0 \tag{8}$$

$$r_D = Z_D/Z_0 \tag{9}$$

式中：R_s 为源内阻；R_a、X_a 分别为换能器辐射阻抗的实部和虚部；ω_0 为角频率；k_t^2 为薄膜换能器的机电耦合系数；C_0 为夹层电容；ε_0 为真空介电常数；ε_r 为压电薄膜的相对介电常数；S 为换能器的有效面积；f_0 为 1/2 波长换能器对应频率；f 为工作频率；Z_D、Z_0 分别为传声介质和压电薄膜的声阻抗。

同时，由于该延迟线延迟时间很长，三次渡越抑制满足要求，所以在设计时，使归一化延迟时间处于菲涅尔区，避免产生衍射损耗，从而达到降低插入损耗的目的。

通过选用与传声介质声阻抗相匹配的金属材料作为底电极来达到降低结合层损耗的作用。

同时，压电薄膜换能器阻抗实部通常只有零点几欧，与 50 Ω 系统阻抗严重失配，因此需要采用匹配网络来使换能器匹配于系统，从而减小反射损耗。根据 Masson 等效电路[9]计算：

$$Z_{in} = 1/j\omega_0 + P(f)/R_0(\omega C_0)^2 = R_a + jX_a \tag{10}$$

$$P(f) = \frac{2j(1-\cos\theta_0)+(Z_1+Z_2)\sin\theta_0}{(1+Z_1Z_2)\sin\theta_0 - j(Z_1+Z_2)\cos\theta_0} \tag{11}$$

式中：Z_1 为上电极阻抗；Z_2 为底电极阻抗。对于薄电极，$Z_1=0$，$Z_2=r_D$。

2.3 声体波微波延迟线性能

基于上述设计，研制出了性能良好的声体波微波延迟线，实测性能完全满足制作距离标定模块的要求。测试结果如表 1 所示。

表 1　BAW 微波延迟线技术要求及实测指标

	技术要求	实测指标
频率范围/GHz	1.4～1.6	1.4～1.6
延迟时间/μs	20.0±0.1	20.012
插入损耗/dB	≤55	45
带内波动/dB	≤3	2
直通抑制/dB	≥35	55
三次抑制/dB	≥30	35
电压驻波比	≤2.5	2.0
延迟时间变化/ns（−10～+50 ℃）	≤100	≤50

2.4 现场标定测试

在某型雷达上用距离标定模块与标定铁塔进行现场对比测试。测试结果如表 2 所示。

表 2　距离标定模块与标定铁塔标定数据

距离值	距离标定模块	标定铁塔	备注
不跳变的点数	18	4	雷达的距离量化单位是 3.75 m
跳变 1 个单位的点数	0	8	
跳变 2 个单位的点数	0	6	

从表 2 标定数据测试结果显示，使用标定铁塔进行标定测试，18 个频率点中有 4 个点在标定测距过程中距离值不跳变，有 8 个点在标定过程中距离值有 1 个距离量化单位的跳变，有 6 个点在标定过程中距离值有 2 个以上量化单位的跳变。

而使用距离标定模块进行测试，雷达模拟回波信号很稳定，18 个频率点在标定测距过程中距离值始终保持不变。在天线波束范围内改变雷达天线的瞄准指向，距离值也始终不变换。这说明，距离标定模块在该雷达整个频带范围内，模拟回波的距离变化量远小于 1 个距离量化单位。并在波束范围内，不受雷达天线指向的影响。

3　分析与讨论

在现场测试时，采用标定铁塔进行标定测试，大多数频点距离会跳变的原因，是因为标定铁塔并非一个点目标，铁塔的塔身上各点相对于雷达的距离就存在一定的差异。各点回波的叠加直接影响到回波的前沿和重心（该被测雷达采用的是重心测距）。当雷达频点改变时，天线波束指向会有一点变化，从而引起铁塔各点回波叠加结果的变化，造成回波前沿和重心改变，引起距离值变化。另外，在标定铁塔

相同的距离上的地物反射也会影响到回波的前沿和重心，从而引起距离值变化[10-11]。

而距离标定模块模拟的回波，接近于一个理想点目标产生的回波，回波叠加的影响很小。这是因为采用距离标定模块进行标定测试时，该距离标定模块是放置在被测试雷达附近（数十米远处）的高处。放置距离标定模块的建筑产生的回波与距离标定模块经过延时后放出来的回波在距离上相差很大。放置距离标定模块的建筑产生的回波在几十米远，而该距离标定模块的回波在 3 km 处。因此，放置距离标定模块的建筑产生的回波不影响该距离标定模块的回波。

另外，由于该距离标定模块是放置在被测试雷达附近的高处。经过延时后放出来的回波相当于该距离标定模块方向 3 km 处目标的回波。而该方向 3 km 附近的地物由于受到建筑物的遮挡，雷达波束照不到这些地物上，也就不存在波束主瓣地物反射的影响。所以，距离标定模块产生的回波很稳定，无距离跳变的情况。用其进行雷达距离标定，精度远高于使用铁塔标定。

BAW 微波延迟线是一种较理想的微波延迟器件。采用上、下变频技术可大幅度扩展声体波微波延迟线的使用范围。基于 BAW 微波延迟线构成的雷达距离标定模块进行雷达距离零点的标定，操作简便，对测试场地要求低，精度比原来采用标定铁塔进行标定的方法精度高。可以满足精密跟踪雷达距离零点的标定要求。并且还可以作为雷达目标模拟器，用于跟踪雷达微波相位和跟踪特性的调试，经过改造后还可以用于雷达抗地杂波改善因子的测试。

4 结束语

本项目研制的基于声体波微波延迟线的雷达距离标定模块经过现场测试和后续改进，该雷达距离标定模块已用于多个雷达生产和维修厂家的雷达调试和验收。

使用声体波微波延迟线构成的雷达距离标定模块，除了可以用于雷达距离零点的标定，还可以拓展作为雷达目标模拟器，用于跟踪雷达微波相位和跟踪特性的调试，经过改造后还可以用于雷达抗地杂波改善因子的测试。

致谢：感谢中国电子科技集团公司重庆声光电公司汤劲松首席专家和王宗富高级工程师在研发过程中的指导。

参考文献：

[1] 王小谟，匡永胜，陈忠先. 监视雷达技术[M]. 北京：电子工业出版社，2008：278-289.

[2] 邓斌. 雷达性能参数测量技术[M]. 北京：国防工业出版社，2010：156-1603.

[3] 邹士迁，刘鑫. 火控雷达距离测量误差分析及修正方法[J]. 火力与指挥控制，2013，38(5)：148-151.
ZOU Shiqian，LIU Xin. Error analysis and correction of range error for fire control radar[J]. Fire Control & Command Control，2013，38(5)：148-151.

[4] OLSON F A. Today's microwave acoustic (bulk wave) delay lines[J]. Microwave Journal，1970，13：65-70.

[5] KING D G. Bulk wave ultrasonic delay lines for frequencies from 5 MHz to 5 GHz[J]. GEC Journal of Science & Technology，1974，41(2)：75-88.

[6] 丁鹭飞，耿富录，陈建春. 雷达原理[M]. 4 版. 北京：电子工业出版社，2009：264-293.

[7] DEFRANOULD P. Bulk acoustic microwave delay lines：design，fabrication and performance[J]. IEEE Proceedings，1984，131(4)：216-224.

[8] 王宗富. 微波声体波延迟线[J]. 压电与声光，1985，7(2)：8-10.
WANG Zongfu. Microwave bulk acoustic wave delay lines[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics，1985，7(2)：8-10.

[9] REEDER T M，WINSLOW D K. Characteristics of microwave acoustic transducers for volume wave excitation[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques，1969，MTT-17(11)：927-941.

[10] 陈伯孝. 现代雷达系统分析与设计[M]. 西安：西安电子科技大学出版社，2012：344-363.

[11] 余成节. 多径传播对距离零值标定的影响[J]. 电讯技术，2008，48(9)：60-62.
XU Chengjie. Influence of multi-path signal on equipment time delay calibration[J]. Telecommunication Engineering，2008，48(9)：60-62.