

基于声体波延迟线的火控雷达组网标定信标

周文佳, 慕德俊

(西北工业大学 自动化学院, 陕西 西安 710072)

摘 要: 提出了一种基于声体波延迟线构成的组网标定信标方案, 介绍了信标的工作原理和使用该信标进行组网标定和检查的方法, 分析了使用该信标进行标定的精度, 以及为保证标定精度在信标设计上应考虑的问题, 并给出了具体设计的样机实例和对比测试结果. 实际测试结果表明, 基于声体波延迟线构成的火控雷达组网标定信标, 标定精度比较高, 抗干扰能力比较强, 操作简便, 可全天候使用, 可以解决目前火控组网系统传统标定方法存在的标定精度差、夜间标定困难等问题, 并且能够用于火控组网系统静态联动精度的检查.

关键词: 声体波延迟线; 信标; 反舰标定; 声传播损耗; 方位标定

中图分类号: TN955

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2016)08-0173-04

A Calibration Beacon Scheme Based on Bulk Acoustic Wave Delay Line in Fire Control Radar Network

ZHOU Wen-jia, MU De-jun

(College of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: This paper presents a calibration beacon scheme based on bulk acoustic wave delay line, introduces the principle and calibration method, analyses the precision and design parameters. Reality test result shows that this calibration beacon method has the advantage of high calibration precision, strong anti-interference capability, easy operation, and all weather used, which could solve the problem in the traditional calibration method in the fire control radar network system. And it also can be used to examine static linkage accuracy in fire control radar network system.

Key words: bulk acoustic wave delay line; beacon; inverse boresight calibration; sound propagation loss; azimuth calibration

1 引言

地面火控雷达组网是提高火控雷达作战效能的重要手段, 在现有的火控组网系统中, 突出的问题之一就是组网精度较差, 无法在多站联动的模式下实现集火射击.

影响火控组网精度的因素比较多, 包括组网的标定精度、数据同步精度、随动精度、坐标转换精度和射击诸元解算精度等. 现有火控组网系统中, 标定精度是影响火控组网精度的重要因素之一.

目前火控组网系统常用的方位标定方法有反舰标定法、测地标定法、卫星标定法等.

这些方法都各自存在优缺点. 利用光学设备的反舰标定法操作简单、方位标定精度高, 但作用距离有限. 参照物标定法操作简单, 但标定精度较差, 也不能在能见度比较差的情况下使用. 而使用 GPS 或北斗卫星定位定向设备进行标定, 便捷迅速, 但卫星系统在战时易受干扰. 另外, 使用 GPS 或北斗定位定向设备等方法进行标定, 存在着整个组网系统的标定精度无法检查, 当某一个环节发生问题时无法及时发现的缺点.

本文中描述的基于声体波延迟线构成的组网标定信标, 是一种体积小、重量轻、操作简便、可全天候使用、工作可靠的组网标定设备.

2 基于声体波延迟线的火控组网标定信标

火控组网标定信标是一种可产生高精度雷达固定距离回波的设备,火控雷达能跟踪该设备产生的回波,并利用火控雷达自身高精度测角和测距性能,完成火控雷达组网系统内部的位置和指向的标定.

2.1 组成和原理

火控雷达组网标定信标由微波延迟电路、环形器和微波喇叭组成.其组成原理框图如图 1 所示.

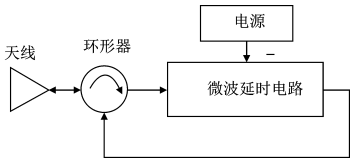


图 1 标定信标原理框图

标定信标的工作原理是雷达天线对准信标发射微波信号,信标的微波喇叭接收雷达发射的微波信号,经环形器送入微波延迟电路进行延迟,延迟后的微波信号再经过环形器送回给微波喇叭发射出去.雷达接收信标发回的经过延迟后的微波信号,就相当于接收到一个在距离上与信标延迟时间一致的固定目标产生的虚拟回波.

由图 1 可以看出,组网标定信标的核心部件就是微波延迟电路.微波延迟电路由微波延迟模块和微波频率源模块组成,如图 2 所示.

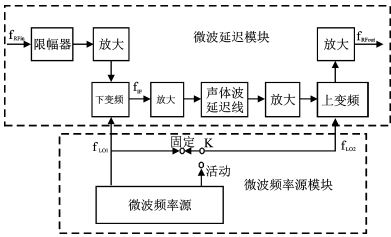


图 2 微波延迟电路组成框图

2.2 组网信标标定方法

2.2.1 反视标定法

反视标定法以往常用于火控系统与武器之间的相对方位指向和位置之间的标定.

用组网信标对系统进行反视标定,其方法与传统的方法基本相同,但是测角和测距可采用信标来完成,作用距离更远.由于组网信标可以产生具有固定目标特性和动目标特性的回波,雷达操作手很容易从地杂波背景中区分出组网信标产生的回波,不会发生跟踪错误.因此,组网信标可全天候使用.

2.2.2 单点定位法

单点定位法与目前组网系统传统的参照物标定法类似,传统的参照物标定法需要先用其他方法进行方位标定,然后再利用火控雷达自身的测距功能,测量组网系统中各站到参照物的斜距离,并计算各站的位置标定.

单点定位法是在组网系统内各站都可以通视的位置架设信标和经纬仪.通过经纬仪将选择的基准站的方位角传递给其他站,通过测量各站到信标的方位角 β 、仰角 ϵ 和斜距离 D_R 计算出各站相对于基准站的位置坐标.由于组网信标的微波延时功能已经避开了雷达最小作用距离和近程增益控制范围的影响,因此标定信标可以架设在比较近的地方,这样就比较方便在架设信标的地点同时架设经纬仪.单点定位法采用经纬仪测角、信标定位,标定精度比较高.

2.2.3 两点定位法

单点标定法需要使用经纬仪传递角度,因此该方法只能在能见度比较好时使用.当能见度不好时,可使用两点标定法进行标定^[1].测试原理图见图 3.

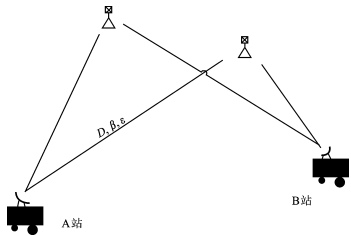


图 3 利用组网信标进行标定原理图

在阵地附近,选定两个组网系统中各站都可通视的位置架设信标(为保证标定精度,两点必须有一定的距离),选择组网系统中的一部站作为基准站(如 A 站),用简易方法进行方位和位置标定,再测量各站到两个信标的距离和夹角,通过计算就可以得到各站(如 B 站)相对于基准站的位置坐标和标定角度值.整个计算有专用的计算程序.

2.3 精度分析

使用组网标定信标进行标定时,其标定精度主要由测距精度和测角精度共同决定.

2.3.1 测距精度分析

信标的延时精度主要由声体波延迟线的温度漂移所决定.声体波延迟线的温度漂移与棒体材料有关,通过选择棒体材料,可以将温度漂移控制在 60ppm/℃,变化规律比较温定,因此,可以根据系统测试时的环境温度查温度修正曲线进行修正.根据实际测试,经过温度曲线补偿,声体波延迟线的标定

精度可以达到 1 m 以内。

雷达的测距精度主要由雷达测距时产生的系统误差和随机误差,以及量化误差所决定,其中系统误差可以通过距离零位的标定来消除。由于组网标定信标本身也就是一个距离零位标定装置,因此,在组网标定前先对雷达距离零位进行标定,理论上可以将系统误差减到最低。

影响雷达测距随机误差的因素较多,除雷达自身因素外,目标的特性、回波的多路径效应及目标周围的物体和雷达天线波束副瓣方向上的地物的反射,也是影响雷达测距精度的重要因素^[2-3]。

以前火控组网系统在使用参照物法对系统进行标定时,需要火控雷达跟踪参照物上的目标或架设的角反射体,由于目标回波的信噪比、多路径效应,以及参照物周围的物体和雷达天线波束副瓣方向上的地物的影响,雷达回波是由多种反射波叠加而成,因此测距不够准确。

采用组网信标进行标定,信标产生的回波信噪比足够,且延迟了一个固定距离(如 3 km)。即雷达跟踪的是位于信标后方(3 km)的虚拟目标,见图 4。

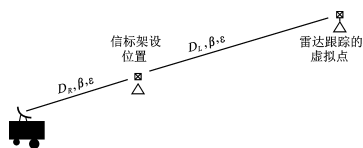


图 4 跟踪虚拟目标示意图

当雷达跟踪虚拟目标时,信标周围地物和雷达天线波束副瓣方向上地物的影响,都会因为距离的延长和遮挡,影响大幅度减弱(几乎可以忽略不计)。因此,虚拟目标就相对于一个理想的点目标。测距和测角精度都会远高于火控雷达跟踪精度指标。根据实际测试,其距离测量精度主要受火控雷达的距离量化精度限制。

2.3.2 测角精度分析

在使用反觎标定法进行组网标定时,如果能见度许可,应优先使用光学手段进行测角,这时其测角精度可以达到 0.3 密位。但在多数情况下,由于能见度和距离的限制,无法使用光学手段进行测角,这时就需要用雷达进行跟踪测角。使用雷达进行跟踪测角,其测量精度主要由雷达自身的跟踪精度、被跟踪目标的特性和测量环境决定。

与上一节分析的一样,以前火控组网系统在使用参照物法对系统进行标定时,由于目标回波的信噪比、多路径效应,以及参照物周围的物体和雷达天

线波束副瓣方向上的地物的影响,雷达回波是由多种反射波叠加而成,因此跟踪测角也不准确。特别是在仰角上,由于被跟踪的标志物与地物是连在一体的,因此多数情况下都无法跟踪。而采用组网信标进行测角时,雷达跟踪的是接近于理想点目标的虚拟回波,多点反射和天线副瓣的影响将大为减少,因此跟踪精度大幅度提高,其角跟踪精度将主要取决于雷达自身的跟踪性能。

3 组网标定信标的设计

3.1 延迟时间选择

由于火控雷达都有防止近距离目标造成接收机饱和的近程增益控制(STC)电路,它将近距离目标产生的回波大幅度衰减,而组网标定时需要回波的幅度必须足够才能保证测距的测角的精度。为减少近程增益控制电路对回波信号的衰减,微波延时电路的延时时间应足够避开近程增益控制电路的影响。

由上一节的精度分析已知,延迟时间越长,主瓣和副瓣方向上的地物反射影响会越小,因此声体波延迟线的延迟时间需要尽量长一些。但由于声体波微波延迟线的声传播损耗 L_t 与工作频率 f 和延迟时间 T 有如下关系^[4]:

$$L_t \approx \alpha f^2 T \quad (1)$$

式中, α 为传声介质的传播损耗因子。

由式(6)可知,声体波延迟线的延迟时间越长,声传播损耗就会越大,因此声体波延迟线的延迟时间也不能太长,否则过大的声传播损耗会降低信号的幅度和信噪比。

另外,声体波延迟线的延迟时间越长,温度漂移产生的总的延时变化量会越多,同样制约延迟时间的大小。

由于本方案设计的信标用于目前常用的火控雷达的组网标定,经过综合考虑,选择声体波延迟线的延迟时间为 20 μ s(相当于 3 km 处目标产生的回波),可以满足以上几种雷达的组网标定需求。

3.2 信噪比

为了保证标定精度,需要信标产生的模拟目标信噪比足够高^[5],这就需要微波延时电路设计时,保证各级都工作在最佳工作区间内,各级信号不能过小,也不能过大引起过饱和。

3.3 工作带宽

为了方便组网标定,标定信标应该有足够的工作带宽。在该工作带宽之内,信标的各项指标应该满足标定要求,这样就不需要通过频繁调整信标的中

心工作频率来满足各雷达工作频点的变化。

带宽的选择与声体波延迟线的工作频率有关,工作频率越高,频带就可以做得越宽。在相同的延迟时间下,声体波延迟线的插入损耗与工作频率的平方成正比,工作频率越高,插入损耗就会越大。由于延迟时间已经被限定为 $20\ \mu\text{s}$,考虑到整个声体波延迟线插入损耗的设计余量和带宽的需要,经综合考虑,本方案选则声体波延迟线的工作频率为 $1.5\ \text{GHz}$ 。在此频率下可以保证整个 $20\ \mu\text{s}$ 延迟线的插入损耗小于 $50\ \text{dB}$,带宽可以做到 $200\ \text{MHz}$,基本满足组网标定的需要。

4 实际测试

4.1 标定对比测试

在某火控组网系统上,使用角反射体与组网标定信标进行标定对比测试。用测量精度为 $0.1\ \text{m}$ 的红外测距机和红外反射镜作为距离真值,角度采用火控系统中光电系统分划十字中心为基准,结果显示:用角反射体进行标定,雷达在仰角上无法准确跟踪角反射体,需要采用手动方式瞄准目标后关闭雷达仰角的驱动电路,才能保证雷达在方位和距离上跟踪目标。此时,雷达测得的距离值会随着雷达在 16 个频点上跳频产生比较大的变化,误差在 10 以内,跟踪方位角度也会随着雷达在 16 个频点上跳频,在 1.5 密位以内变化。

用组网标定信标进行标定,测量得到的距离值非常稳定,随着雷达在 16 个频点上跳频,距离值没有任何变化,与真值相差在 $3\ \text{m}$ 以内(该型雷达的距离量化精度是 $3.75\ \text{m}$)。角度跟踪在方位和仰角上都非常稳定,误差在 0.8 密位以内。

4.2 组网测试

在某型组网系统上,分别使用参照物标定、北斗卫星定位定向设备标定和组网信标标定,并分别使用标定信标对组网系统静态联动精度进行检查。检查方法:(1)选一个点架设信标;(2)选组网系统中的任意一部站,采用主动跟踪的方式跟踪该信标,得到该信标虚拟点的坐标值 D 、 β 和 ϵ ;(3)关闭雷达方位角和仰角驱动,将测量得到的信标虚拟点斜距离值 D 减去信标的标称延迟距离值 D_L ,得到此时信标的延迟距离值 D_R ;(4)将信标的坐标值 D_R 、 β 和 ϵ 输入雷达,并转入主动跟踪工作方式(不开雷达方位角和仰角驱动),其他站进入被动跟踪;记下各被动跟踪站的距离和角度值,然后各站再采用主动跟踪方式跟踪该信标,并读出此时信标相

对于本站的真实坐标值 D_R 、 β 和 ϵ ($D_R = D - D_L$);(5)比较各站被动跟踪和主动跟踪时信标的坐标 D_R 、 β 和 ϵ 数值的差异,差值就是组网系统在该方向上静态联动精度。分别在另外两个方向上再选两个点用同样的方法进行检查。

需要指出的是,虽然火控组网系统静态联动精度包含了各站的标定误差、调平误差、随动系统的静态跟踪误差和火控计算机的位置坐标的转换计算误差,但是影响系统静态联动精度的主要因素还是标定误差。

用组网标定信标分别对采用参照物标定、北斗卫星标定和组网信标标定后的火控组网系统的静态联动精度进行了检查,结果显示:采用传统的参照物标定方法,标定精度最差;采用北斗卫星定位定向设备标定和采用组网标定信标标定,精度基本相当,距离误差小于 $10\ \text{m}$,角度误差小于 3 密位。

5 结束语

基于声体波延迟线和变频技术构成的火控雷达组网标定信标,操作比较简便,可在近距离和夜间使用。相对于使用 GPS 和北斗系统,抗干扰能力更强,可以解决目前火控组网系统传统标定方法存在的标定精度差、夜间标定困难等问题。该信标适用范围比较广,不但可以用于火控组网的标定和静态联动精度的检查,还可以用于对火控雷达的距离零点、静态跟踪性能等指标的检查。

参考文献:

- [1] 常利胜,邵命山.地域防空火控网的定位研究[J].军事运筹与系统工程,2001,2:62-64.
- [2] 楼宇希.雷达精度分析[M].北京:国防工业出版社,1979:66-83.
- [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.
- [4] 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.
- [5] 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,2012:59-63.

作者简介:

周文佳 女,(1986-),博士研究生.研究方向为无线自组织网络和雷达组网. E-mail:zhouwj1986@163.com.

慕德俊 男,(1963-),教授,博士生导师.研究方向为控制理论与应用、网络信息安全.