Radar Science and Technology

DOI:10.3969/j.issn.1672-2337.2017.05.008

基于副瓣注入的多方位目标模拟方法研究

李兴民,张 良

(中国人民解放军 92941 部队 93 分队, 辽宁葫芦岛 125001)

摘 要:提出了一种解决雷达应答式射频目标模拟器多方位、多目标模拟的方法——副辦注入方法, 分析了该方法的基本原理和实现多目标模拟的基本条件,对影响模拟目标的数量和多目标之间的夹角进 行了分析;依据雷达方程,在雷达指标一定的前提下,对目标模拟器的主要参数进行了分析设计,对设计结 果进行了仿真计算和分析。

关键词: 雷达; 目标模拟; 副辦; 动态范围; 灵敏度; 增益

中图分类号:TN955; TN959 文献标志码:A 文章编号:1672-2337(2017)05-0500-05

Multiple Target Simulation Method Based on Sidelobe Injection

LI Xingmin, ZHANG Liang

(Unit 92941 of PLA, Huludao 125001, China)

Abstract: A solution to multi-azimuth and multi-target simulation for radar responder RF target simulator—sidelobe injection method—is put forward. The basic principle of the method and the basic conditions of multi-target simulation are analyzed. The number of simulated targets and the angle between multiple targets are also analyzed. Based on radar equation, the main parameters of the target simulator are analyzed and designed under the given radar specifications. The design results are calculated, simulated, and analyzed.

Key words: radar; objective simulating; sidelobe; dynamic range; sensitivity; gain

0 引 言

现代舰载防空武器系统都具备拦截多目标 的能力,舰载防空武器系统试验时,必须考核系 统拦截多目标的性能。为此,靶场必须具备多目 标供靶能力。为武器系统试验提供真实的多批空 中靶标,不仅试验成本提高,也给试验组织实施带 来一定难度。为了解决这一问题,靶场研制了一种 应答式射频目标模拟器,能在同一方位上产生多 批目标,一定程度上解决了靶场多目标供靶难题。 但是,这种传统的目标模拟器只能模拟同一方 位上的目标,当需要考核武器系统多方位上的 拦截性能时,就必须配置多个目标模拟器。本文 研究了一种新方法,用该方法设计的应答式射 频模拟器可以模拟多方位上的多批目标,解决 了武器系统多方位拦截能力考核中的多目标供 靶难题。

副瓣注入多方位目标模拟方法的 基本原理

1.1 传统应答式射频目标模拟器模拟目标的原理

应答式射频目标模拟器模拟目标的原理是^[1]: 雷达和模拟器工作在能通视的条件下,雷达天线 波束扫描到模拟器天线时,模拟器接收雷达的高 频辐射脉冲,经过放大、检波、解调,得到模拟目标 所需的雷达参数,以接收到的雷达脉冲前沿为同 步脉冲,把需要模拟目标的距离、速度、RCS等信 息调制到发射脉冲上,经延时放大后发射,供雷达 接收,雷达就能收到具备特定信息的目标回波。

传统的应答式射频目标模拟器只能和雷达天 线的主瓣进行射频信号收发交联,因此,只有当 雷达天线主瓣对准模拟器时,模拟器才能完成目 标的模拟,也就是模拟器只能在一个方位上模拟 目标。

1.2 副瓣注入多方位目标模拟方法的基本原理

本文提出的新方法原理是:通过合理设计 目标模拟器的参数,当雷达天线主瓣、副瓣扫过模 拟器天线主瓣时,雷达和模拟器均能建立起正常 的信号收发交联,在雷达上显示的是在模拟器为 中心位置和模拟器左右方向相隔主副瓣夹角的 3 个目标,实现一个模拟器同时模拟多方位目标的 目的。

1.2.1 实现副瓣注入多方位目标模拟的基本 条件^[2]

为了实现模拟器和雷达天线主副瓣之间射频 信号收发交联,必须满足下列条件:

1) 雷达的动态范围必须大于雷达的副瓣电平;

 2)模拟器的动态范围必须大于雷达的副瓣 电平;

3)模拟器的发射功率满足雷达主副瓣接收 要求;

4)模拟器的接收机灵敏度必须满足模拟器接收雷达主副瓣要求。

对于条件 2)~4),可以通过设计模拟器指标 来实现;对于被试雷达来说,技术指标已确定,是 否满足条件 1),必须对其进行分析。

接收机动态范围^[3] 定义为满足接收机正常工作的最大输入能量L_{max}与最小输入能量(接收机灵 敏度)L_{min}的比值,即

$$D = 10 \lg \frac{L_{\max}}{L_{\min}} \tag{1}$$

L_{min}越小,表明接收机接收微弱信号的能力越 好,雷达的作用距离就越远;L_{max}越大,表明接收 机抗饱和能力越强;D越大,表明雷达接收机性能 越好。雷达接收机放大信号范围如图1所示。



从图 1 可以看出,只有当接收机输入功率 L 满 足 $L_{min} < L < L_{max}$ 时,接收机才可能以放大倍数 $K = L_{\text{Mill}} / (L_{max} - L_{min}) 对输入信号进行线性放$ $大,当输入信号小于 <math>L_{min}$ 或大于 L_{max} 时,接收机都 不能正常工作。

也就是说,为了模拟器和雷达天线主副瓣之间射频信号收发交联,模拟器发射的信号功率必须足够大,保证雷达副瓣接收功率大于 L_{min},但发射功率又不能无限制增大,还必须保证雷达主瓣接收功率必须小于 L_{max}。由于雷达主副瓣接收到的功率除了与模拟器发射功率、雷达和模拟器之间距离有关外,还与雷达主副瓣增益有关。因此,必须分析雷达主副瓣增益及它们之间的关系。

把雷达第一副瓣增益与主瓣增益的比值定 义为副瓣电平^[4](F)。为了保证雷达主副瓣同时 和模拟器交联工作,雷达天线端收到的信号功率 必须满足一定的范围,设满足雷达主瓣接收的 最小功率为1,则满足雷达副瓣接收的最小功率为 1/|F|,也就是说,雷达接收机应该在信号强度为 1/|F|倍的范围内,既能接收小信号,又不至于信 号过大而过载,即要求雷达必须满足D>1/|F|。 一般雷达是否满足这一条件,必须对雷达的天线 方向图进行分析。

1.2.2 雷达主副瓣之间的关系分析

下面用一个近似的数学模型^[5]分析雷达主副 瓣增益、主副瓣夹角之间的关系。

对于抛物面天线、喇叭天线、阵列天线,当天 线口径大于雷达波长5倍时,归一化天线增益可近 似表达为

$$F^{2}(\theta) = \frac{G(\theta)}{G(0)} = \left(\frac{\sin x}{x}\right)^{2}$$
(2)

$$c = \frac{\pi a}{\lambda} \theta \tag{3}$$

式中, $G(\theta)$ 为天线任意方位角处 θ 的增益,G(0)为天线主瓣最大增益,d为天线口径, λ 为雷达波长。归一化天线增益方向图如图 2 所示。

通常情况下, 雷达第一副瓣最大值出现在 $sinx = \pm 1 \mathcal{D}$,此时:

$$\frac{\pi d}{\lambda}\theta = \pm \frac{3}{2}\pi$$
(4)

取 $\lambda = 0.1 \text{ m}, d = 1.5 \text{ m}, \text{则} \theta = \pm 5.7^{\circ}.$

当 $\theta = \pm 5.7^{\circ}$ 时,即副 全 万 为



$$F^{2}(\theta_{1}) = (\frac{\sin x}{x})^{2} = (\frac{1}{1.5\pi})^{2} = 0.045$$
 (5)

 $10 \lg F^2(\theta_1) = -13.5 \, \mathrm{dB}$ (6)

上述研究结果表明,对于采用抛物面天线、喇叭 天线、阵列天线的雷达,当 $\lambda = 0.1 \text{ m}, d = 1.5 \text{ m}$ 时, 其副瓣电平近似为 - 13.5 dB(主瓣增益比副瓣增益大 22 倍左右),雷达第一副瓣与主瓣的夹角为 5.7°,一般雷达第一副瓣与主瓣的夹角在几度至几十度范围内(肯定大于雷达方位角分辨率)。对于采用副瓣抑制、副瓣对消等技术的雷达,副瓣电平的绝对值稍大一些,一般在 <math>- 20 dB(100 fb) 左右,而一 $般雷达的动态范围在 60 \text{ dB 左右,满足 <math>D > 1/|F|$ 的基本条件。

综上所述,只要合理设计模拟器的技术指标, 就可以用一个模拟器模拟雷达主瓣和两个第一副 瓣上的3个目标,3个目标在方位上的最小角度在 几度到几十度范围内。

2 副瓣注入多方位目标模拟器的 主要指标设计

设雷达的技术指标如下:雷达发射功率 P;雷达最小可检测功率 L_{\min} ;雷达天线主瓣增益 G_z ;雷达天线副瓣增益 G_f ;雷达工作波长 λ ;雷达接收机 正常工作最大不饱和功率 L_{\max} ;雷达副瓣电平 F; 接收机动态范围 D。

当雷达和目标模拟器之间的距离为R,需要设 计的模拟器参数如下:发射天线增益 G_{mi} ;发射机 功率 P_m ;接收天线增益 G_{mi} ;接收机灵敏度 L_{mmin} ; 接收机动态范围 D_m ;工作波长 λ 。

根据二次雷达方程^[6],对模拟器主要指标进 行设计:

$$R^{2} = \frac{P_{\rm m}G_{\rm z}G_{\rm mf}\lambda^{2}}{(4\pi)^{2}L_{\rm min}}$$
(7)

2.1 模拟器发射端参数设计

模拟器发射端设计参数主要是发射机功率和 天线增益。

为了保证雷达副瓣能收到模拟器的发射信号,目标模拟器发射机参数应满足:

$$P_{\rm m}G_{\rm mf} > \frac{(4\pi R)^2 L_{\rm min}}{G_{\rm f}\lambda^2} \tag{8}$$

同时,为了保证雷达主瓣接收到信号后不过载,目标模拟器发射机参数还应满足:

$$P_{\rm m}G_{\rm mf} < \frac{(4\pi R)^2 L_{\rm max}}{G_z \lambda^2} \tag{9}$$

根据动态范围的定义,可将式(9)变为

$$P_{\rm m}G_{\rm mf} < \frac{(4\pi R)^2 DL_{\rm min}}{G_z \lambda^2} \tag{10}$$

保证雷达主副瓣同时能正常工作的模拟器发 射端参数为

$$\frac{(4\pi R)^2 L_{\min}}{G_{\rm f} \lambda^2} < P_{\rm m} G_{\rm mf} < \frac{(4\pi R)^2 D L_{\min}}{G_{\rm z} \lambda^2} \quad (11)$$

2.2 模拟器接收端参数设计

模拟器接收端设计参数主要是接收机天线增益、灵敏度和动态范围。此时的二次雷达方程中, 雷达相当于信号发射源,模拟器为信号接收机。

根据

$$R^{2} = \frac{PG_{z}G_{mj}\lambda^{2}}{(4\pi)^{2}L_{mmin}}$$
(12)

当雷达副瓣对准模拟器时,应保证模拟器能 接收到雷达信号,即

$$\frac{G_{\rm mj}}{L_{\rm mmin}} < \frac{(4\pi R)^2}{PG_{\rm f}\lambda^2} \tag{13}$$

当雷达主瓣对准模拟器时,应保证模拟器不 过载,即

$$\frac{G_{\rm mj}}{L_{\rm mmax}} > \frac{(4\pi R)^2}{PG_z \lambda^2} \tag{14}$$

根据动态范围的定义,可将式(14)变化为

$$\frac{G_{\rm mj}}{D_{\rm m}L_{\rm mmin}} > \frac{(4\pi R)^2}{PG_z\lambda^2}$$
(15)

模拟器接收端参数应满足的条件为

$$\frac{G_{\rm mj}}{L_{\rm mmin}} < \frac{(4\pi R)^2}{PG_{\rm f}\lambda^2}$$

$$\frac{G_{\rm mj}}{D_{\rm m}L_{\rm mmin}} > \frac{(4\pi R)^2}{PG_{\rm z}\lambda^2}$$
(16)

3 对设计结果的仿真计算

为了验证模拟器主要指标的设计结果在工程 上能否实现以及实现的难易程度,需要对设计结 果进行仿真计算。

设被试雷达为普通的脉冲雷达,取其技术指标如下:雷达发射脉冲功率为 50 kW,动态范围为 40 dB,灵敏度为 – 90 dBm,天线主瓣增益为 30 dB,天线副瓣增益为 5 dB,波长为 10 cm,取 R = 30 km。

3.1 对模拟器发射系统设计指标的仿真计算

将式(11)变形,得到下面两个公式:

$$P_{\rm m}G_{\rm mf} = \frac{(4\pi R)^2 L_{\rm min}}{G_{\rm f}\lambda^2} \tag{17}$$

$$P_{\rm m}G_{\rm mf} = \frac{(4\pi R)^2 DL_{\rm min}}{G \lambda^2}$$
(18)

以 *P*_m 为横坐标、*G*_{mf} 为纵坐标,分别以式 (17)、式(18)绘制两条曲线,如图 3~图 5 所示。



发射机天线增益取值范围局部放大图



图 5 正常模拟多目标时模拟器发射机功率与 发射天线增益最优参数取值图

图 3 中,两条曲线中间包围的部分就是满足不 等式(11)条件的区域。其中图 4、图 5 是图 3 的局 部放大,图 5 中实线 II 为实线 I 和实线 II 的中间 线,代表保证雷达主副瓣同时能正常工作的模拟 器发射端的最优参数,在实线 III 上选 10 个点,如表 1 所示。

表1 模拟器发射端的最优参数对应表

参数	值								
$P_{ m m}/{ m W}$	18.3	12.2	9.2	7.3	6.1	5.2	4.6	4.1	3.7
$G_{m}(倍数)$	4	6	8	10	12	14	16	18	20

从表1可以看出,对于一部普通的脉冲雷达, 当雷达和模拟器相距30km时,保证雷达主副瓣 同时能正常工作的模拟器发射端的最优参数,发 射功率在3.7~18.3W之间,发射天线增益在4~ 20之间,这在工程上是很容易实现的。

3.2 对模拟器接收系统设计指标的仿真计算

仿照 3.1 节的方法, 将式(13)、式(14) 变形为 $\frac{(4\pi R)^2 D_{\rm m}}{PG_{\rm s}\lambda^2} < \frac{G_{\rm mj}}{L_{\rm mmin}} < \frac{(4\pi R)^2}{PG_{\rm f}\lambda^2}$ (19)

式(19)中有3个变量,为了分析问题方便, 取变量 D_m定值,分析其他两个变量的相互关系。 为了检验模拟器接收系统在工程上实现的难易程度,D_m取工程上容易实现的数值。

以 G_{mj} 为横坐标、L_{mmin} 为纵坐标,取 D_m 为 50 dB,绘制仿真曲线如图 6 所示。其中曲线 Ⅰ、 Ⅱ、Ⅲ 代表的意义与图 3 相同。

以 G_m 为横坐标、L_{mmin} 为纵坐标,取 D_m 分别 为 50,45,40,35 和 30 dB,以式(19)右式的结果绘 制曲线,如图 7 所示。



图 6 正常模拟多目标时模拟器接收机天线增益与 灵敏度取值范围



图 7 正常模拟多目标时模拟器接收机天线增益与 灵敏度最优参数取值范围

仿照 3.1 节中的方法,曲线 $\prod_1 \sim \prod_5$ 代表当 雷达主瓣对准模拟器时模拟器不过载、当雷达副 瓣对准模拟器时模拟器能正常工作的模拟器接收 端的最优参数(接收机灵敏度、接收机天线增益), 在实线 $\prod_1 \sim \prod_5$ 上选 10 个点,如表 2 所示。

G _m (倍数) -	$L_{ m mmin}/ m dBm$									
	$D_{\mathrm{m}} = 50$	$D_{\rm m} = 45$	$D_{\mathrm{m}} = 40$	$D_{\rm m} = 35$	$D_{\rm m} = 30$					
1	-62.0	-59.5	-57.0	-54.5	-52.0					
2	-59.0	-56.5	-54.0	-51.5	-49.0					
3	-57.3	-54.8	-52.3	-49.8	-47.3					
4	-56.0	-53.5	-51.0	-48.5	-46.0					
5	-55.0	-52.5	-50.0	-47.5	-45.0					
6	-54.3	-51.8	-49.3	-46.7	-44.3					
7	-53.6	-51.1	-48.6	-46.1	-43.6					
8	-53.0	-50.5	-48.0	-45.5	-43.0					
9	-52.5	-50.0	-47.5	-45.0	-42.5					
10	-52.0	-49.5	-47.0	-44.5	-42.0					

从表 2 可以看出,在模拟器接收机动态范围分 别取 50,45,40,35 和 30 dB 时,当接收机天线增益 在 1~10 之间变化时,接收机灵敏度在-42~ 62 dBm 之间变化,这在工程上是很容易实现的。

4 结束语

本文提出的基于副瓣注入的多方位目标模拟 方法能够解决应答式射频目标模拟器多方位多目 标模拟的技术难题。理论分析表明,该方法的依据 科学合理;仿真计算分析表明,该方法在工程上是 容易实现的。对于不同频段的脉冲雷达,通过合理 设计模拟器的技术参数,可以用一个模拟器模拟 方位上相差几度到几十度的3个目标。将该方法 应用到现代舰载防空武器系统拦截多目标的能力 试验及作战部队演练中,军事经济效益将十分显 著。该方法也可以推广应用到需要模拟雷达多方 位多目标的应用场合。

参考文献:

- [1] 李兴民,王国田,李国君. 战术导弹火控系统动态精度 仿真试验方法研究[J]. 长春理工大学学报(自然科学 版),2007,30(4):31-34.
- [2] 李国刚,梁浩,徐艳国. 单通道副瓣影响分析及抑制方 法[J]. 现代雷达, 2015, 37(2):5-7.
- [3] 奧列格 V·西特尼科. 伪随机序列调制信号的多普勒频移估计[J]. 雷达科学与技术, 2014, 12(2):117-122.
 SYTNIK O V. Doppler Shift Estimation of Signals Modulated by Pseudorandom Sequences [J]. Radar Science and Technology, 2014, 12(2):117-122.
- [4] 王奕波,施海荣,赵伟.基于信号幅相特性的副瓣跟踪 自动识别方法[J].电子与信息学报,2014,36(12): 2975-2979.
- [5] 王星. 航空电子对抗原理[M]. 北京:国防工业出版 社,2008:199-200.
- [6] 丁鹭飞,耿富录,陈建春. 雷达原理[M]. 5 版. 北京: 电子工业出版社, 2013:255.

作者简介:



李兴民 男,1962年生,山东青州人, 高级工程师,主要研究方向为目标探 测跟踪及制导控制。