

海面多路径效应对雷达探测性能的影响分析

宋伟, 姜亮

(中国人民解放军 92941 部队 94 分队, 辽宁 葫芦岛 125001)

摘要: 为了分析某型搜索雷达在对低空目标威力检飞试验中出现点迹丢失、航迹中断问题的具体原因, 针对被试雷达的性能指标和技术特点, 对影响雷达低空探测性能的技术参数进行了实际测量, 测量结果表明雷达工作正常, 根据雷达试验时的实际使用环境, 初步定位雷达威力下降的具体原因是由于海面多路径效应造成; 在建立低空目标多路径回波模型的基础上, 分析了多路径回波合成场强引起的雷达波束分裂对雷达探测威力的影响, 并通过对被试雷达多路径效应下威力方向图仿真对这一结论予以验证, 分析对比表明, 实际试验中雷达探测目标点迹丢失严重及出现航迹中断距离范围与仿真结果相吻合; 研究结果对搜索雷达系统设计及靶场试验结果评定具有一定的指导意义。

关键词: 多路径效应; 搜索雷达; 波束分裂; 雷达威力

Influence Analysis of Sea Surface Multipath Effect on Radar Detection Capability

Song Wei, Lou Liang

(Element 94, Unit 92941 of PLA, Huludao 125001, China)

Abstract: In order to find out the reason of radar plot missing and track Interrupt-oriented during radar coverage test for low altitude target, aiming at performance index and technical feature of under proof radar, technical parameters which have effect on radar low altitude detection performance were measured. Result show that radar works properly. According to radar actual environmental conditions, the reason of radar coverage decline was initially mapped on sea surface multipath effect. Based on the model establishing of low altitude multipath echo waveform, the effect on radar detecting coverage of beam splitting caused by multipath effect echo synthesis strength was analyzed, to validate conclusions, radar vertical coverage pattern in the condition of multipath effect was simulated, comparison and analysis testified that the distance of radar plot missing and track Interrupt-oriented conform very closely to simulation result. The analysis result is of great significant to radar design and range trial.

Keywords: multipath effect; search radar; beam splitting; radar coverage

0 引言

作为现代舰载武器系统的重要组成部分, 搜索雷达主要用来完成对目标的远程探测和捕获, 以保证武器系统能够完成对来袭目标进行打击的作战任务。根据战术操作流程, 搜索雷达发现目标后, 要向跟踪雷达等跟踪器提供目标指示信息, 从而达到目标交接的目的^[1]。如果在主要作战区段搜索雷达不能及时提供目标指示信息, 不但延长武器系统反应时间, 而且有可能错失最佳打击时机。警戒搜索雷达探测发现目标的能力既取决于雷达本身的性能特性, 也取决于雷达的环境特性^[2], 舰载搜索雷达在探测和跟踪低空来袭目标时, 除了低层大气的不均匀性引起的电波折射效应外, 还要面对复杂海面背景, 一方面是海杂波的影响, 同时海面产生的镜面反射或漫散射还会引起多路径效应^[3]。海面多路径效应使得雷达接收的信号为直达波信号与镜反射信号的相干合成波。随着表面发射系数的变化和高度目标的影响, 接收信号呈现出被增强和被衰减交替出现的现象(当直达波信号与镜反射信号相位相同时增强, 相位相反时衰减), 当目标恰好处于波瓣分裂削弱区时, 接收信号被衰减, 雷达发现概率下降, 造成目标点迹丢失或航迹中断, 雷达

不能很好地探测低空目标^[4]。

本文针对某型搜索雷达在实际对低空目标威力检飞试验中出现的点迹丢失、航迹中断现象展开分析, 首先对影响雷达探测性能的相关技术指标进行测试, 排除雷达故障原因; 通过建立低空目标多路径回波模型, 推导了低空目标的反射波与直达波矢量叠加后的归一化场强对雷达探测威力的影响。在此基础上对被试雷达多路径效应下的威力方向图进行了仿真, 验证了产生雷达点迹丢失、航迹中断的具体原因。

1 试验问题的引出

某型号搜索雷达在实际低空目标威力检飞试验中, 出现在威力指标内某距离段上探测性能下降, 点迹丢失严重, 所有航次在某距离段上均出现航迹中断的现象, 点迹统计结果如表 1 所示, 雷达检测目标航迹图如图 1 所示。

从雷达点迹统计结果表中可以看出, 雷达在较远距离(雷达威力指标外)仍能正常发现并跟踪目标, 点迹连续, 航迹稳定。但当目标处于 ΔR_2 、 ΔR_3 距离段内时, 点迹丢失严重, 雷达发现概率下降明显, 所有航次均出现航迹中断现象(连续 3 点点迹丢失, 航迹中断), 目标航迹图如图 1(a) 所示; 当目标经过 ΔR_4 以后又能重新发现并稳定跟踪目标, 直到目标进入 ΔR_5 距离段内时, 又出现点迹严重丢失, 雷达发现概率明显下降现象, 且部分航次再次出现航迹中断现象, 目标航迹图如图 1(b) 所示。

收稿日期:2018-03-15; 修回日期:2018-04-24。

作者简介:宋伟(1981-),男,吉林磐石人,工程师,主要从事武器系统测试检验工作方向的研究。

表 1 搜索雷达威力试验点迹统计结果表

航次	各区段搜索雷达发现点数									
	$\Delta R_1/\text{km}$	$\Delta R_2/\text{km}$	$\Delta R_3/\text{km}$	$\Delta R_4/\text{km}$	$\Delta R_5/\text{km}$	$\Delta R_6/\text{km}$	$\Delta R_7/\text{km}$	$\Delta R_8/\text{km}$	$\Delta R_9/\text{km}$	$\Delta R_{10}/\text{km}$
1	7	5	6	8	6	7	8	6	8	8
2	8	4	6	7	5	7	7	7	7	8
3	7	4	5	7	5	8	8	8	8	8
4	8	3	5	8	6	7	7	8	7	8
5	8	4	6	8	5	6	8	8	8	8
6	7	6	5	8	6	8	8	8	8	8
发现概率	0.938	0.542	0.687	0.958	0.687	0.896	0.958	0.938	0.958	1
备注	每个区段搜索雷达发现点数为 8, 不足为丢点。									

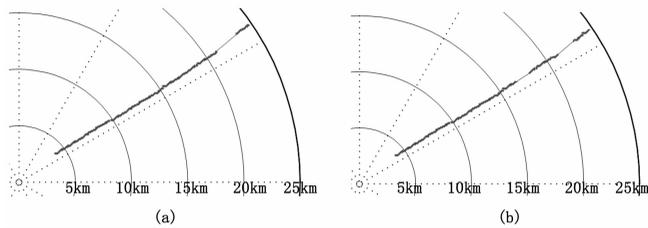


图 1 实际试验中搜索雷达检测目标航迹图

2 雷达技术指标测试

该型号搜索雷达为海背景下对空搜索雷达, 雷达工作环境存在很强的海杂波, 天线仰角波束覆盖范围相对较宽, 在对低空目标探测过程中, 可能会同时收到海杂波和多路径效应的影响。针对目标在特定距离段丢失的情况, 为了排除雷达自身故障原因, 分别对雷达发射功率、虚警概率、MTD 改善因子等影响雷达探测性能的指标进行了测试, 各项指标均满足要求。通过对雷达工作频段及当时试验环境进行分析初步得出造成雷达在 ΔR_2 、 ΔR_3 和 ΔR_5 距离段内雷达探测性能下降的原因是由于海面多路径干涉的影响, 使得雷达接收信号被衰减, 从而引起目标点迹丢失严重, 航迹中断。

3 建立低空目标多路径回波模型

根据电磁波理论, 雷达发射的电磁波在传播过程中, 由于海面、地面和附近舰船及岛屿等物体的反射, 使得雷达与目标之间电磁波的传播途径不止一条, 除了从雷达到目标之间的直接传播外, 还包含多条反射路径, 最终导致雷达所接收到的回波信号为直射路径和反射路径回波信号的叠加矢量和, 这种现象被称为“多路径效应”^[5]。

由于实际的应用环境比较复杂, 多路径传播具有很大的随机性, 建模的难度较大^[6]。为了说明多路径效应, 图 2 给出了典型多路径效应的回波模型, 其中, A 为雷达天线, 距离海面高度为 h_a , B 为目标, 高度为 h_t 。由于海面镜面反射的影响, 从雷达 A 到目标 B 之间除了从 A 到 B 的直射波以外, 还有 A 经地面的 C 点反射到达 B 点的反射波, R 为直射波传播距离, R' 为反射波传播距离。

直射波和反射波的传播路径不同就会导致相位的差异, 相位差的大小和距离差成正比。用 φ_d 表示反射波与直射波由于距离差所引起的相位差, 则:

$$\varphi_d = \frac{2\pi}{\lambda}(R' - R) \quad (1)$$

式中, λ 是雷达的工作波长。通常天线的高度 h_a 总是远小于到目标的距离 R, 则:

$$\Delta R = 2h_a \sin \epsilon_1 \approx \frac{2h_a(h_a + h_t)}{R'} \quad (2)$$

一般情况下, $h_a \ll h_t \ll R$, 因此可以近似认为 $\epsilon_1 = \epsilon_2$, 则 (2) 式可进一步写成 $\Delta R \approx \frac{2h_a h_t}{R'}$, 所以最后得到反射波与入射波的相位差是:

$$\varphi_d \approx \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{2h_a h_t}{R'} \quad (3)$$

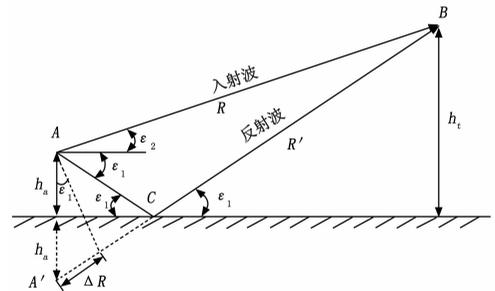


图 2 低空目标多路径反射模型

4 多路径回波合成场强对雷达作用距离的影响分析

目标 B 处的电磁场强度, 是直射波和反射波的电磁场强度的矢量和。设目标处入射波与反射波的场强分别为 E_1 、 E_2 , 则:

$$E_1 = \frac{245 \sqrt{P_t \cdot G_t}}{R} \cos \omega t \quad (4)$$

$$E_2 = \frac{245 \sqrt{P_t \cdot G_2}}{R + \Delta R} \rho \cos(\omega t - \theta - \frac{2\pi}{\lambda} \Delta R) \quad (5)$$

式中, P_t 为辐射功率, G_1 、 G_2 分别表示直射波和反射波对应的天线增益, ΔR 为直射波和反射波的波程差, R 为目标与雷达站之间的距离, ρ 、 θ 分别表示反射系数的模和相角。

一般情况下, 当天线垂直波束最大值指向水平面时, $G_1 = G_2$, 则目标所在的处的合成场强为:

$$E_0 = E_1 + E_2 = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + 2E_1 E_2 \cos(\theta + \frac{2\pi}{\lambda} \Delta R)} = E_1 \sqrt{1 + \rho^2 + 2\rho \cos(\theta + \frac{2\pi}{\lambda} \Delta R)} \quad (6)$$

反射系数的模值 ρ 和相角 θ 由反射面的性质、擦地角 ϵ_1 、

工作频率以及电波极化等因素决定, 已经得到了一些典型曲线供查用。当采样水平极化波且擦地角 ϵ_1 较小时, $\rho \approx 1, \theta \approx 180^\circ$ 且 ρ, θ 值随着 ϵ_1 的增大变化较缓慢^[7]。此时,

$$E_0 = E_1 \sqrt{2 - 2\cos(\frac{2\pi}{\lambda}\Delta R)} = 2E_1 \sin \frac{\pi}{\lambda}\Delta R = 2E_1 \sin(\frac{2\pi h_a h_t}{\lambda R}) \quad (7)$$

上述干涉条件下的功率密度 E_0^2 为:

$$E_0^2 = E_1^2 [1 + \rho^2 + 2\rho\cos(\theta + \frac{2\pi}{\lambda}\Delta R)] = 4D_1 \sin^2(\frac{2\pi h_a h_t}{\lambda R}) \quad (8)$$

在擦地角很小时, 直射波和反射波互相抵消, 从而使接近水平目标(低空和超低空)的检测十分困难^[8]。

由式(8)可得到有镜反射影响时雷达接受功率为:

$$P_r = \frac{P_i G A_r \sigma}{(4\pi)^2 R^4} [4\sin^2(\frac{2\pi h_a h_t}{\lambda R})]^2 \quad (9)$$

此时雷达最大作用距离 R'_{max} 可在式 $R_{max} = [\frac{P_i \tau G_1 G_2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 k T_0 F_n D_0 C_B L}]^{1/4} e^{0.115\delta R_{max}}$ (此式为考虑传播衰减后的雷达作用距离方程, 其中 δR_{max} 为最大作用距离情况下单程衰减的分贝数)的基础上修改为:

$$R'_{max} = [\frac{P_i \tau G_1 G_2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 k T_0 F_n D_0 C_B L} [4\sin^2(\frac{2\pi h_a h_t}{\lambda R})]^2]^{1/4} e^{0.115\delta R_{max}} = 2R_{max} \left| \sin(\frac{2\pi h_a h_t}{\lambda R}) \right| \quad (10)$$

由式(10)看出, 由于镜面反射影响, 使雷达作用距离随目标的仰角呈周期性变化, 镜面反射的结果使天线方向图产生花瓣状, 见图3所示。现状讨论上式:

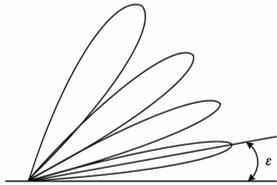


图3 镜面反射的干涉效应

1) 当 $\frac{2\pi h_a h_t}{\lambda R} = \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}, \frac{5\pi}{2} \dots$ 时, $|\sin \frac{2\pi h_a h_t}{\lambda R}| = 1$, 雷达作用距离比没有反射时提高一倍, 这是有利的。

2) 当 $\frac{2\pi h_a h_t}{\lambda R} = 0, \pi, 2\pi \dots$ 时, $\sin \frac{2\pi h_a h_t}{\lambda R} = 0$, 雷达不能发现目标, 对于这样的仰角方向称为“盲区”。

图3的方向图, 是在 $E_2 = E_1$, 即 $\rho = 1$, 以及 $\varphi_r = \pi$ 的条件下得到的。实际的地面或海面的反射, 反射系数的振幅 ρ 总是小于1的小数, 相角 φ_r 也小于 180° 。因此, 有了反射虽会引起方向图的分裂, 但情况不会像上述条件下所得的结果那么明显, 极大值增加的小一些, 极小值不会降到零^[4-5]。

5 仿真验证

根据多路径效应造成波束分裂的理论原理, 结合被试雷达参数及当时海面试验环境, 对被试雷达多路径效应下威力方向图进行仿真, 以此验证试验中部分距离段内点迹丢失严重造成断航的原因是由于海面多路径效应的影响。仿真过程如下:

雷达方向图传播因子:

$$F = f(\theta) \sqrt{1 + \rho^2 + 2\rho\cos(\varphi + \frac{4\pi h f \sin\theta}{c})} \quad (11)$$

式中, h 为天线高度, 为 12 m; θ 为垂直平面内直射方向角; f 为被试雷达工作频率; $f(\theta)$ 为天线方向图系数(以天线垂直面场强最大值归一); ρ 是反射系数振幅: $\rho = r * \rho_0$ 。

式(11)是在假设目标距离远远大于天线高度的情况下导出的, 可近似认为直射方向角等于反射方向角。

雷达作用距离可写为:

$$R_{max} = F * R_0$$

式中, R_0 为自由空间的最大作用距离, 由于 R_0 的计算已考虑了天线方向图的影响, 故在方向图传播因子的计算中 $f(\theta)$ 取为 1。通过软件仿真, 得到被试搜索雷达的低空威力图, 如图4所示。

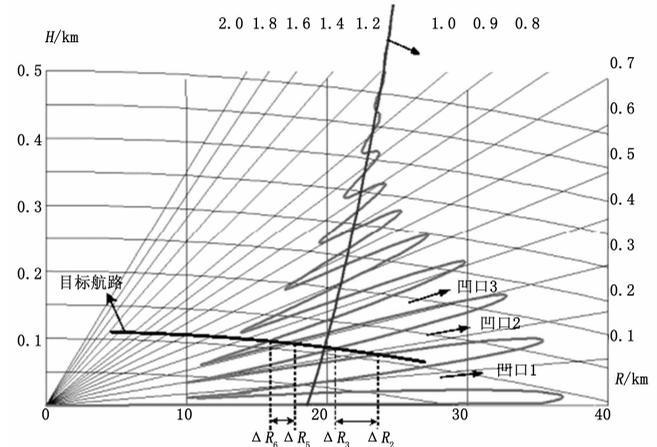


图4 被试搜索雷达低空威力仿真图

从图4可以看出, 由于海面多路径效应的影响, 该型搜索雷达在自由空间的威力范围在不同仰角下发生增强或衰减变化, 当目标处于威力增强处时, 雷达探测性能增强, 虽然已超出雷达自由空间探测威力范围, 但仍能探测到目标; 当目标处于威力衰减处(凹口)时, 雷达探测性能下降, 点迹容易丢失, 等目标穿越凹口后雷达又能够重新发现并跟踪目标。实际试验目标航路如上图所示, 整个航路跨越“凹口2”和“凹口3”, “凹口2”的距离段约是 $\Delta R_5 \sim \Delta R_6$, “凹口3”的距离段约是 $\Delta R_2 \sim \Delta R_3$ 。仿真得出的“凹口2”和“凹口3”距离段范围与实际试验中雷达探测目标点迹丢失严重及出现航迹中断距离范围相吻合。

综上所述, 被试搜索雷达在低空目标检飞时, 部分距离段目标点迹丢失及航迹中断的原因在于多路径干涉的影响, 当目标恰好处于波瓣分裂削弱区时, 就会导致目标点迹丢失的现象发生。多路径盲区周期与目标高度、雷达布站高度及工作频率有关。对于宽带雷达, 通过频率捷变或准捷变使不同频率(足够的频差)在某一方向上驻留足够的时间, 根据不同频率多路径影响下回波强度不同来避开多路径盲区, 从而实现低空稳定跟踪^[9]。试验过程中, 雷达架高基本保持不变, 出现航迹中断的航次目标飞行高度较低, 而目标飞行高度较高的航次搜索雷达均能在威力指标范围内实现连续稳定跟踪。由于被试雷达工作频段限制, 解决低空补盲问题可以考虑雷达编队组网方式加以解决。