

常规地基雷达对低空小目标探测的可能性分析

吴永辉¹, 胡伟稿², 马晓岩³

(1. 空军雷达学院研究生队, 湖北 武汉 430019; 2. 空军雷达学院科研部, 湖北 武汉 430019;
3. 空军雷达学院信息工程系, 湖北 武汉 430019)

摘要: 推导出一个较为全面实用的雷达小目标探测距离公式, 结合某先进雷达分析了杂波后向散射系数、雷达脉冲宽度、水平波束宽度、改善因子和目标散射截面积对小目标探测距离的影响, 为提出低空小目标探测的综合对策奠定了基础。

关键词: 雷达; 巡航导弹; 探测距离

中图分类号: TN911.7

Possibility Analysis of Normal Ground-based Radar Detecting Low-altitude Small Target

Wu Yonghui¹, Hu Weigao², Ma Xiaoyan³

(1. Group of Graduate, AFRA, Wuhan 430019, China; 2. Division of Scientific Research, AFRA, Wuhan 430019, China;
3. Department of Information Engineering, AFRA, Wuhan 430019, China)

Abstract: A systematic and practical formula for radar detecting of small targets is derived. The backward scattering coefficient of clutter, the radar pulse-width and the horizontal beam-width, the improvement factor and the effect of a target's scattering RCS on a small one's detecting distance are covered in more detail, which paves the way for the synthesized countermeasure of low altitude small target detection.

Key words: radar; cruise missile; detection distance

本文所论及的低空小目标对象主要是指巡航导弹。它是一种无人驾驶、携带战斗部、用动力支撑其重量, 靠吸气式发动机推动前进的有翼自控飞行器。近10年来, 巡航导弹多次在实战中作为空袭的首攻武器, 实施突然性打击, 取得了很好的战绩, 已成为实现战场“零伤亡”作战思想的主力进攻武器。

巡航导弹利用空气动力学原理和地形匹配制导进行低空飞行, 飞行高度一般低于50m, 海面最低可达几米, 陆上平坦地域亦可达十几米至几十米。其射程通常在50~3000km。巡航导弹不像飞机存在起落架、武器挂件等, 且本身体积小, 故其雷达散射截面积小。采用隐身技术和低可探测特性复合材料后, 其雷达散射截面积进一步减小。许多巡航导弹的雷达散射截面积小于 0.1 m^2 , 有的甚至仅

为 $0.001 \sim 0.027\text{ m}^2$ 。在飞行过程中, 巡航导弹反射信号淹没在强地物杂波中, 因此具有很强的突防能力, 常规雷达对其探测具有相当的难度。

本文通过大量计算, 对地面情报雷达探测巡航导弹的可能性作了初步评估, 为下一步深入研究相应对策作了先导性工作。

1 雷达对巡航导弹探测距离公式的推导

在忽略“多径效应”的情况下, 常规雷达对低空小目标的探测受如下三个因素的制约: (1) 功率; (2) 目标高度; (3) 杂波抑制能力。

1.1 基于功率的探测距离

依雷达威力图, 在相同探测距离、虚警概率及目标散射特性下, 设对截面积为 σ 的常规目标的

收稿日期: 2002-04-08; 修订日期: 2002-05-20

基金项目: 全军“十五”军事理论研究课题

作者简介: 吴永辉 (1976-), 男, 硕士生。

距离为 r_{\max} , 则按雷达方程折算出截面积为 σ_i 小目标的探测理论距离 r_{m1} 为

$$r_{m1} = (\sigma_i / \sigma)^{1/4} r_{\max} \quad (1)$$

1.2 基于目标高度的探测距离

在雷达探测较远距离的目标时, 由于电磁波的直线传播及地球表面的弯曲, 目标有可能处在雷达所发射的电磁波无法达到的视线盲区, 此时雷达无法发现目标。

设雷达天线架高为 h_a , 目标高度为 h_i , 则当 h_a 和 h_i 一定时, 雷达有一个极限观察距离, 该距离为雷达在地平面上的最大观察距离, 称为雷达的直视距离, 设为 r_{m2} 。当雷达对某目标最大探测距离 r_{m1} 大于雷达直视距离 r_{m2} 时, 在 r_{m2} 至 r_{m1} 的距离范围内, 目标还处于盲区, 尽管此时目标在雷达的最大探测距离内, 雷达也无法发现该目标。

考虑大气对电磁波的折射时, r_{m2} 与 h_a 和 h_i 的关系为^[1]

$$r_{m2} = 4.12(\sqrt{h_a} + \sqrt{h_i}) \cdot 10^3 \quad (2)$$

1.3 基于杂波抑制的探测距离

(1) 计算距雷达直线距离为 r 的目标(杂波)分辨单元面积为 $A_r = 0.5\tau cr\theta_p$, 式中 τ 为雷达脉冲宽度(脉压后), c 为光速, θ_p 为雷达水平波束宽度(3 dB 功率点)。

(2) 计算 A_r 范围内的杂波雷达散射截面积(RCS)值为 $\sigma_c = A_r \sigma_0$, 式中 σ_0 为地(海)面杂波后向散射系数。

(3) 计算出 r 处的杂信功率比, 作为雷达信号处理系统的输入杂信功率比 $(P_c / P_s)_i = \sigma_c / \sigma_i$, 式中 σ_i 为雷达在目标的正前方观测时目标的雷达散射截面积(RCS)。

(4) 按在 $P_d = 0.9, P_n = 10^{-6}$ 的情况下, 正常检测所需要的信号处理系统输出信杂比 $(P_s / P_c)_e \geq 13.2$ dB, 计算出所需的改善因子 $I = 10 \log(\sigma_c / \sigma_i) + 13.2$ (dB)。

(5) 按以上步骤反推, 可得当雷达的实际改善因子为 I 且以 dB 表示时, 在 $P_d = 0.9, P_n = 10^{-6}$ 的情况下, 理论上能够发现巡航导弹的最大距离为

$$r_{m3} = (\sigma_i \cdot 10^{(I-13.2-10)/10}) / (0.5\tau c \theta_p) \quad (3)$$

故雷达对低空小目标最大探测距离为

$$r_m = \min\{r_{m1}, r_{m2}, r_{m3}\} \quad (4)$$

2 数值计算

2.1 应用式(3)的前提条件

式(3)的前提条件是雷达工作在小俯角状态。

所谓小俯角指的是: 当由 $0.5c\tau$ 确定的雷达分辨单元面积小于波束照射面积时, 雷达波束中轴线与水平面的夹角。在这种情况下, 实际雷达分辨单元面积如式(2)所示。而当雷达波束俯角较大(大俯角是指: 当由 $0.5c\tau$ 确定的雷达分辨单元面积大于波束照射面积时, 雷达波束中轴线与水平面的夹角)时, 实际雷达分辨单元面积即为波束照射面积为 $A_r = 0.25\pi r^2 \theta_p \theta_v \csc \phi$, 式中 θ_v 为雷达垂直波束宽度(3 dB 点), ϕ 为雷达俯角。

不难证明, 大俯角与小俯角的临界角满足下式

$$\tan \phi_c = r \theta_v / (0.5\tau c) \quad (5)$$

可见, 只要雷达工作时的俯角 $\phi < \phi_c$ ($\phi = \arctan(h_a/r)$), 其中 h_a 为雷达架高, r 为雷达与目标之间的水平距离, 即可认为雷达工作于小俯角状态。也就是说, 只要针对不同雷达的不同雷达架高, 计算其在探测 $5 \text{ km} \sim r$ 之间的目标时其临界角是否存在, 就可判定上述距离公式是否可用, 或应在哪种情况下换为大俯角条件下的距离公式。经计算, 在绝大多数情况下, 尤其是当目标与雷达之间水平距离大于 10 km 时, 可认为雷达工作于小俯角状态。另外, 由式(5)可以看出, 雷达架高 h_a 越大、雷达压缩后的脉宽 τ 越宽、目标与雷达之间的水平距离 r 越小以及雷达垂直波束 θ_v 越窄, 越易出现大俯角状态。如具有优良低空性能的国产某全相参雷达, 经计算, 当目标距离在 $5 \sim 100 \text{ km}$ 之间时, 只要架高小于 5000 m , 该雷达都工作在小俯角状态。下列计算均以此雷达为模型, 记为 MR。

2.2 杂波后向散射系数对探测距离影响的计算

地(海)杂波对雷达探测巡航导弹性能的影响集中体现杂波后向散射系数 σ_0 对探测距离 r 的影响上, 由式(3)可得 MR 雷达对巡航导弹探测距离 r 随杂波散射系数 σ_0 变化的情况, 如图 1、表 1 所示(取 $\sigma_i = 0.1 \text{ m}^2$)。由此可见, 随着杂波后向散射系

表 1 不同杂波后向散射系数时的探测距离

杂波后向散射系数 σ_0 /dB	探测距离 r /km
-25	54.8
-23	34.6
-21	21.8
-19	13.8
-17	8.7
-15	5.5

数 σ_0 (dB)的增大, MR 雷达对巡航导弹的探测距离 r 迅速下降, 即杂波后向散射系数 σ_0 对 MR 雷达的探测性能有明显的影响。在其它参数一定时, 杂波后向散射系数 σ_0 越大, 雷达也就越难探测到目标。

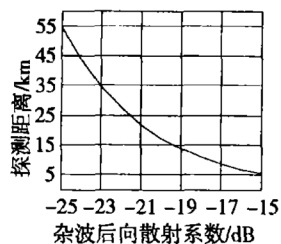


图1 不同杂波后向散射系数时的探测距离

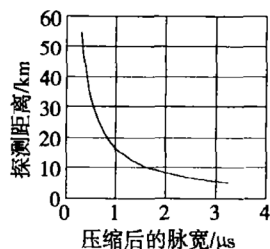


图2 不同脉宽时的探测距离

2.3 压缩后的脉宽对探测距离影响的计算

取定 $\sigma_0 = -25\text{dB}$, 即可得脉宽 τ 对MR雷达最大理论探测距离的影响, 如图2、表2所示(取 $\sigma_t = 0.1\text{m}^2$). 由此可见, 雷达探测距离 r 随压缩后的脉宽 τ 的增大而减小. 若希望雷达对巡航导弹有较好的探测性能, 在功率不变的情况下, 则要求雷达的脉冲宽度 τ (压缩后) 足够窄. 取定以上参数, 由计算可知, 如该雷达脉宽 τ 小于 $0.33\text{ }\mu\text{s}$, 即可在 50 km 处探测到巡航导弹; 如小于 $0.16\text{ }\mu\text{s}$, 则该雷达可在 100 km 处探测到巡航导弹.

表2 不同脉宽时的探测距离

压缩后的脉宽 $\tau/\mu\text{s}$	探测距离 r/km
0.3	54.8
0.4	41.1
0.5	32.9
0.8	20.6
1.6	10.3
3.1	5.3

2.4 水平波束宽度 θ_h 对探测距离 r 影响的计算

取定 $\sigma_0 = -20\text{ dB}$, 即可得水平波束宽度 θ_h (3 dB功率点) 对MR雷达最大理论探测距离的影响, 如图3及表3所示(取 $\sigma_t = 0.1\text{m}^2$). 由此可见, 雷达探测距离 r 随水平波束宽度 θ_h 的增大而减小. 若希望

表3 不同水平波束宽度时的探测距离

水平波束宽度 $\theta_h/^\circ$	探测距离 r/km
0.5	48.5
0.6	40.4
0.8	30.3
1.2	20.2
2.4	10.1
4.8	5.1

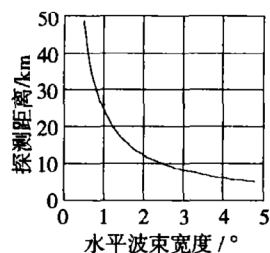


图3 不同水平波束宽度时的探测距离

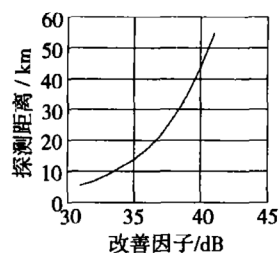


图4 不同改善因子时的探测距离

雷达对巡航导弹有较好的探测性能, 则要求雷达的水平波束宽度 θ_h 足够窄. 在取定以上参数的情况下, 由计算可知, 如该雷达水平波束宽度 θ_h 小于

0.49° , 即可在 50 km 处探测到巡航导弹; 如小于 0.24° , 则该雷达可在 100 km 处探测到巡航导弹.

2.5 改善因子对探测距离影响的计算

取定 $\sigma_0 = -20\text{ dB}$, 即可得改善因子 I 对MR雷达最大理论探测距离的影响, 如图4、表4所示(取 $\sigma_t = 0.1\text{m}^2$). 由此可见, 改善因子 I 的dB值与雷达

表4 不同改善因子时的探测距离

改善因子 I/dB	探测距离 r/km
31	5.5
33	8.7
35	13.8
37	21.8
39	34.6
41	54.8

探测距离成正指数关系. 另外, 经计算, 雷达在 100 km 处正常检测目标所需的改善因子 I 比在 5 km 处正常检测目标时所需的改善因子 I 大 13 dB 左右. 而在雷达实际工作中, 总的改善因子受天线波束调制、杂波内部起伏及雷达系统本身的不稳定(本振频率、相参频率和发射频率不稳定)等多种因素的影响而难以大幅度提高, 这在一定程度上限制了雷达对巡航导弹的检测.

2.6 目标雷达散射截面 σ_t 对探测距离 r 影响的计算

取定 $\sigma_0 = -20\text{ dB}$, 即可得目标雷达散射截面 σ_t 对MR雷达最大理论探测距离的影响, 如图5、表5所示. 由此可见, 目标雷达散射截面 σ_t 与雷

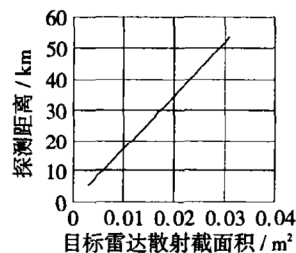


图5 不同目标雷达散射截面时的探测距离

达探测距离 r 成正比关系. 目标雷达散射截面 σ_t 越大, 雷达的探测距离就越远. 在取定参数且不考虑其它因素的情况下, 若目标雷达散射截面 σ_t 小于 0.03 m^2 时, 雷达对其探测距离小于 50 km , 即很难发现目标了.

表5 不同目标雷达散射截面时的探测距离

目标雷达散射截面 σ_t/m^2	探测距离 r/km
0.003	5.2
0.006	10.4
0.012	20.8
0.018	31.2
0.024	41.6
0.031	53.7

3 结论

在本文的计算中,忽略了雷达所发射电磁波的极化以及目标的起伏等因素,这具有一定的合理性,其计算结果是基本可信的.从计算结果看,若要求雷达对低空小目标具有一定的探测能力,雷达必须具有发射功率大、脉冲宽度窄、水平波束宽度窄、改善因子大以及杂波抑制能力强等特点.此

外,由于架高对探测距离的限制,雷达还必须架设于一定的高度之上,这样才有可能在较远处发现目标.基于此种考虑,将雷达升空,并尽量向外延伸,也将有利于尽可能远地探测到低空小目标.

参考文献:

- [1] 丁鹭飞.雷达原理[M].陕西:西北电讯工程学院出版社, 1984.

(上接第6页)

对角加载时, M 取34、48、64、128、256、512对应的均衡器剩余幅度失配、剩余相位失配最佳值 E_a 。分别取-59.7491、-64.2844、-67.1531、-69.3122、-71.7295、-73.8229 (单位均为dB), E_p 取0.0017、 6.2048×10^{-4} 、 4.6138×10^{-4} 、 2.8919×10^{-4} 、 1.7053×10^{-4} 、 1.6118×10^{-4} (单位均为度).由此可见,矩阵病态解决后,均衡器的校正性能得到了极大的提高.

(2)存在对角加载时,在 BT 、 N 一定的情况下, E_a 、 E_p 随 L 的变化均为一凹形曲线.这说明存在一个最佳对角加载因子,既能解决矩阵的病态,又能使均衡器校正性能最好.

(3)对于同一个 L , M 越小,均衡效果就越差.但在 M 比 N 大的多的范围内,均衡器的校正性能对 M 变化并不敏感,这是因为均衡器的自由度由 N 确定^[6],当 M 较大时,均衡器的性能近似与 M 无关.

4 结论

本文基于最小二乘的广义求逆法求解均衡器权系数,在均衡器阶数较大时,首先讨论了矩阵产

生病态的原因,接着说明通过对角加载可以解决矩阵的病态,最后给出仿真实验与分析,得出结论:对角加载在解决矩阵病态的基础上,可以显著提高自适应均衡器的性能.

参考文献:

- [1] 傅有光,唐 伟,张 倩.通道间幅相差对旁瓣相消性能的影响与解决方法[J].现代雷达,2000,22(6): 50-55.
[2] 张林让,保 铮,张玉洪.通道响应失配对DBF天线旁瓣电平的影响[J].电子科学学刊,1995,17(3): 268-275.
[3] 苏为民,倪晋麟.通道失配对MUSIC空间谱及分辨率的影响[J].电子学报,1998,26(9): 142-145.
[4] 李英军.自适应均衡电路的研究[D].西安:西安电子科技大学,1994.
[5] Karl Gerlach. The Effects of IF Bandpass Mismatch Errors on Adaptive Cancellation [J]. IEEE Trans. AES, 1990,26(3): 455-468.
[6] 吴 洹,张玉洪,吴顺君.用于阵列处理的自适应均衡器的研究[J].现代雷达,1994,16(1):49-56.