Radar Science and Technology

DOI:10.3969/j.issn.1672-2337.2014.01.020

# 天线副瓣对雷达探测的影响研究

#### 董鹏曙, 金加根, 谢幼才, 王志纲

(空军预警学院,湖北武汉 430019)

摘 要: 雷达天线均有副瓣,而且覆盖主瓣以外的所有区域。为了分析天线副瓣辐射对雷达探测的影响,建立了副瓣辐射、副瓣接收模型,给出了副瓣损耗因子、杂波增强因子与天线主瓣零点宽度、平均副瓣电 平的关系公式。理论分析和计算表明,天线副瓣对雷达最大探测距离有一定的影响,对副瓣自卫距离有较 大的影响,对杂波的影响很小。当天线副瓣较低时(平均副瓣电平优于-30 dB),副瓣损耗因子对最大探测 距离的影响可忽略不计;当天线副瓣较高时(平均副瓣电平-27~-20 dB),副瓣损耗因子对最大探测距离 的影响应予考虑。

关键词: 天线副瓣; 副瓣损耗因子,杂波增强因子; 最大探测距离; 雷达自卫距离

中图分类号:TN957 文献标识码:A 文章编号:1672-2337(2014)01-0112-04

# Study on Influnce of Antenna Sidelobes on Radar Detection

DONG Peng-shu, JIN Jia-gen, XIE You-cai, WANG Zhi-gang (Air Force Early Warning Academy, Wuhan 430019, China)

Abstract: All radar antenna have sidelobes. In order to analyse the influence of antenna sidelobes on radar detection, the antenna sidelobe radiation and receive model is established, the relationship of sidelobe radiation loss factor and clutter enhancement factor between antenna mainlobe width and average sidelobe level is established. Analysis and computation results demonstrate that the sidelobes have a lot of influences on radar max detection range and self-defense range, and less influence on receive clutter. When antenna sidelobes are very low(average sidelobe level less than -30 dB), the influence on radar max detection range can be ignored; otherwise, the influence on radar max detection range must be considered.

Key words: antenna sidelobe; sidelobe loss factor; clutter enhancement factor; max detection range; self-defense range

# 0 引 言

天线在雷达中占有非常重要的地位,其作用 是向探测空域辐射大功率的电磁波,并接收目标 反射的微弱信号。在对雷达探测性能进行分析 时,通常只考虑天线增益、波束宽度等参数<sup>[1-2]</sup>。实 际上,任何雷达天线都有副瓣,而且覆盖主瓣以外 的所有区域。天线副瓣对雷达探测的影响主要包 括三个方面:一是在发射的过程中,副瓣辐射的电 磁波分散了发射能量,降低了主瓣照射功率;二是 在接收的过程中,副瓣接收的杂波与主瓣接收的 杂波叠加在一起,增加了杂波的强度;三是副瓣给 有源干扰提供了进入的通道。由此,导致雷达探 测性能的下降。本文主要分析天线副瓣辐射对雷达探测性能的影响。

# 1 理论分析

#### 1.1 副瓣辐射分析

为了简化分析,以两坐标雷达为例。假设天线 主瓣的零点波束宽度为θ₀,主瓣范围以内单位方位 角的平均辐射功率为P<sub>m</sub>,主瓣范围以外单位方位角 的平均辐射功率为P<sub>r</sub>,天线总辐射功率为P,则

$$\theta_0 \bullet P_m + (360 - \theta_0) \bullet P_r = P \tag{1}$$

定义主瓣以外单位方位角平均辐射功率 *P*, 与主瓣内单位方位角的平均辐射功率 *P*<sub>m</sub>的比值 为平均副瓣 SLL,则

$$\overline{SLL} = \frac{P_r}{P_m}$$
(2)  
由此可得主瓣辐射功率为

$$\theta_0 \cdot P_m = \frac{\theta_0}{\theta_0 + (360 - \theta_0)\overline{SLL}} \cdot P \tag{3}$$

显然,主瓣辐射功率小于总辐射功率。将副瓣辐射 对主瓣辐射的影响定义为副瓣损耗因子 L<sub>3LL</sub>,则

$$L_{\overline{SLL}} = \frac{\theta_0}{\theta_0 + (360 - \theta_0)\overline{SLL}}$$
(4)

#### 1.2 副瓣接收分析

为了保证对低空空域的覆盖, 雷达一般将俯仰面主波束设置为 3 dB 触地。在主波束触地范围内, 面杂波(包括地杂波、海杂波)是目标探测的主要障碍, 面杂波的强弱一般用杂波反射面积 σ<sub>c</sub> 来表征<sup>[3]</sup>。

$$\sigma_{\rm c} = \sigma_0 \cdot \frac{1}{2} c\tau \sec \alpha \cdot R\theta_0 \tag{5}$$

式中, $\sigma_0$ 为面杂波单元的归一化反射系数; 0.5 $c\tau$  seca 为分辨单元距离向的长度, $\alpha$  为雷达照 射的倾角; $R\theta_0$ 为分辨单元方位向的宽度。主瓣 杂波单元如图 1 所示。



图 1 主瓣杂波单元、副瓣杂波单元示意图

考虑副瓣辐射的影响,则主瓣辐射功率为 *L<sub>sLL</sub>P*,副瓣辐射功率为(1-*L<sub>sLL</sub>)P*。将主瓣杂 波反射面积记为σ<sub>cmain</sub>,则有

$$\sigma_{\rm cmain} = L_{\overline{SLL}} \cdot \sigma_0 \cdot \frac{1}{2} c\tau \sec \alpha \cdot R\theta_0 \tag{6}$$

天线副瓣辐射功率同样也接收杂波,而且覆盖主 瓣以外的所有区域。为了简化分析,假设在相同 距离上面杂波的特性一致,归一化反射系数均为  $\sigma_0$ ,将副瓣杂波反射面积记为 $\sigma_{csll}$ ,则

$$\sigma_{\text{csll}} = (1 - L_{\overline{SLL}}) \cdot \sigma_0 \cdot \frac{1}{2} c\tau \sec \alpha \cdot R(360 - \theta_0)$$
(7)

在接收机中,主瓣杂波和副瓣杂波混合在一起,构 成总的杂波。考虑天线主瓣、副瓣增益和收发双 程因素,总的杂波反射面积为

 $\sigma_{c}^{1} = \sigma_{cmain} + \overline{SLL}^{2} \cdot \sigma_{csll} = \sigma_{0} \cdot \frac{1}{2} c\tau \sec \alpha \cdot R \cdot \left[ L_{\overline{SLL}} \theta_{0} + (1 - L_{\overline{SLL}}) (360 - \theta_{0}) \overline{SLL}^{2} \right] \quad (8)$ 

将副瓣辐射对杂波反射面积的影响定义为杂波增强因子 K,则

$$K = \frac{\sigma_{\rm c}^{\rm l}}{\sigma_{\rm cmain}} = 1 + \frac{(1 - L_{\overline{SLL}})(360 - \theta_{\rm 0})\overline{SLL}^{\rm 2}}{L_{\overline{SLL}}\theta_{\rm 0}} \tag{9}$$

一般而言,雷达天线副瓣电平优于 - 20 dB,雷达天 线平均副瓣 SLL 比最大副瓣电平低 3 ~ 12 dB<sup>[4-6]</sup>, 上式中第二项的数值在 0.01 以下。因此,副瓣辐 射对杂波的影响可忽略不计。

#### 1.3 副瓣干扰分析

情报雷达天线通常是圆周扫描工作,干扰对 准主瓣的时间极短,对准副瓣时间极长,干扰主要 通过副瓣进入。雷达抗副瓣干扰能力可用副瓣自 卫距离来度量<sup>[7-8]</sup>。

雷达主瓣接收目标回波信号功率为

$$S = \frac{P_{t}G^{2}\lambda^{2}\sigma}{(4\pi)^{3}R^{4}L}$$
(10)

式中,  $P_1$  为主瓣辐射功率; G 为天线增益;  $\lambda$  为发 射信号波长;  $\sigma$  为目标雷达截面积; R 为目标距 离; L 为损耗。接收系统噪声功率为

$$N = kTB \tag{11}$$

式中, k 为波耳兹曼常数; T 为系统噪声温度; B 为 接收机噪声带宽。雷达副瓣接收干扰信号功率为

$$J = \frac{P_{\rm j}G_{\rm j}G_{\rm r}\lambda^2}{(4\pi)^2 R_{\rm j}^2} \cdot \gamma \tag{12}$$

式中, P<sub>i</sub>为干扰机辐射功率; G<sub>i</sub>为干扰机天线增益; G<sub>r</sub>为雷达天线副瓣增益; R<sub>i</sub>为干扰机距离; γ为极化失配系数。在干扰背景中探测目标,必须 满足

$$\frac{S}{N+J} \geqslant K_{\rm J} \tag{13}$$

式中,K<sub>J</sub>为信号检测所要求的最小信干比。

当雷达天线副瓣增益为 0(即理想无副瓣天 线)时,没有副瓣干扰,雷达探测仅受噪声影响,其 探测距离取最大值:

$$R_{\max} = \left[\frac{P_{t}G^{2}\lambda^{2}\sigma}{(4\pi)^{3}L \cdot kTB \cdot K_{\min}}\right]^{\frac{1}{4}}$$
(14)

式中, K<sub>min</sub> 为信号检测所要求的最小信噪比。 当天线副瓣增益不为 0,则有

$$\frac{P_{i}G^{2}\lambda^{2}\sigma}{(4\pi)^{3}R^{4}L} \cdot \frac{1}{kTB + \frac{P_{j}G_{j}G_{r}\lambda^{2}\gamma}{(4\pi)^{2}R^{2}}} \geqslant K_{J} \quad (15)$$

雷达副瓣自卫距离为

$$R_{\rm J} \leqslant \Big[\frac{P_{\rm r}G^2\lambda^2\sigma}{(4\pi)^3 LK_{\rm J}} \cdot \frac{1}{kTB + \frac{P_{\rm j}G_{\rm j}G_{\rm r}\lambda^2\gamma}{(4\pi)R^2}}\Big]^{\frac{1}{4}}$$
(16)

上式简化可得

$$R_{\mathrm{J}} = R_{\mathrm{max}} \left[ \frac{K_{\mathrm{min}}}{K_{\mathrm{J}}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{P_{\mathrm{j}}G_{\mathrm{j}}G_{\mathrm{r}}\lambda^{2}\gamma}{(4\pi)R_{\mathrm{j}}^{2}kTB}} \right]^{\frac{1}{4}} \qquad (17)$$

假设信号检测所要求的最小信噪比、信干比 相等,则

$$R_{\rm J} = R_{\rm max} \left[ \frac{1}{1 + \frac{P_{\rm j}G_{\rm j}G_{\rm r}\lambda^2\gamma}{(4\pi)R_{\rm j}^2kTB}} \right]^{\frac{1}{4}} = R_{\rm max} \left[ \frac{1}{1 + \frac{P_{\rm j}G_{\rm j}G\lambda^2\gamma}{(4\pi)R_{\rm j}^2kTB} \cdot \overline{SLL}} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (18)$$

Ŷ

$$\alpha_{j} = \frac{P_{j}G_{j}G\lambda^{2}\gamma}{(4\pi)^{2}R_{j}^{2}kTB}$$
(19)

$$\beta_{\rm j} = \frac{P_{\rm j}G_{\rm j}G_{\rm r}\lambda^2\gamma}{(4\pi)^2R_{\rm j}^2kTB}$$
(20)

式中, α<sub>i</sub>, β<sub>i</sub> 分别为雷达天线主瓣接收干噪比和 副瓣接收干噪比, 目

$$\beta_{i} = \alpha_{i} \cdot \overline{SLL} \tag{21}$$

由此可得

$$R_{\rm J} = R_{\rm max} \left[ \frac{1}{1+\beta_{\rm j}} \right]^{\frac{1}{4}} = R_{\rm max} \left[ \frac{1}{1+\alpha_{\rm j} \bullet SLL} \right]^{\frac{1}{4}} (22)$$

雷达副瓣自卫距离由雷达最大探测距离、主瓣 接收干噪比和天线平均副瓣电平等决定。

#### 1.4 副瓣对雷达探测的影响分析

副瓣辐射对雷达探测的影响主要体现在最大 探测距离和副瓣自卫距离上。雷达在无干扰环境下 探测远距离目标时,其主要限制因素是噪声。副瓣 辐射的影响是使主瓣辐射功率降低 L<sub>su</sub> 倍。因此 在雷达方程总的损耗因子中,还需要考虑副瓣损耗 因子 L<sub>su</sub>。

天线平均副瓣电平越低, 雷达副瓣自卫距离越 大。当 *SLL* = 一∞ dB时, 副瓣自卫距离取最大值, 即雷达最大探测距离; 天线平均副瓣电平越高, 雷达 副瓣自卫距离越小。因此, 副瓣电平高低对副瓣自 卫距离有很大影响。 2 计算分析

### 2.1 副瓣损耗

表 1 给出了天线主瓣的零点波束宽度  $\theta_0$ 、平均 副瓣 *SLL* 取不同的值时,副瓣损耗因子  $L_{\overline{SLL}}$  的计算 结果;图 2 给出副瓣损耗因子  $L_{\overline{SLL}}$  随零点波束宽度  $\theta_0$ 、平均副瓣 *SLL* 的变化情况。

表1 副瓣损耗因子 L<sub>stt</sub>

$ heta_{\scriptscriptstyle 0}/(^\circ)$ -	<u>SLL</u> /dB				
	-20	-27	-30	-35	
1	0.2179	0.5826	0.7358	0.8977	
3	0.4566	0.8081	0.8936	0.9634	
6	0.6289	0.8946	0.9443	0.9814	
9	0.7194	0.9278	0.9625	0.9881	
12	0.7752	0.9453	0.9718	0.9911	
15	0.8130	0.9561	0.9775	0.9930	
18	0.8403	0.9635	0.9814	0.9940	
21	0.8613	0.9688	0.9842	0.9950	
24	0.8772	0.9728	0.9862	0.9960	
27	0.8905	0.9760	0.9881	0.9960	
30	0.9009	0.9785	0.9891	0.9970	



由表1和图2可以看到:

(1) 在天线口径确定的条件下,平均副瓣电 平 SLL 越低,零点波束宽度θ。越宽,副瓣损耗因子 L<sub>SLL</sub> 越小;平均副瓣电平 SLL 越高,零点波束宽度 θ。越窄,副瓣损耗因子 L<sub>SLL</sub> 越大。

(2) 对警戒雷达而言<sup>[8]</sup>,其半功率点波束宽度
 θ<sub>0.5</sub> 一般为 5°~10°,零点波束宽度 θ<sub>0</sub> 为 15°~30°,
 平均副瓣电平 SLL 优于-20 dB,副瓣损耗因子 L<sub>3LL</sub>
 在 1 dB 以下,可忽略不计。对引导雷达而言<sup>[8]</sup>,其半

功率点波束宽度 $\theta_{0.5}$ 一般为 $1^{\circ} \sim 2^{\circ}$ ,零点波束宽度  $\theta_{0}$ 为 $3^{\circ} \sim 6^{\circ}$ ,平均副瓣电平 $\overline{SLL}$ 优于-30dB时,副 瓣损耗因子 $L_{\overline{SLL}}$ 在0.5dB以下,可忽略不计;平均副 瓣电平 $\overline{SLL}$ 在 $-27 \sim -20$ dB时,副瓣损耗因子  $L_{\overline{SLL}}$ 在 $1 \sim 3.5$ dB之间,计算雷达最大探测距离时 应予考虑。

#### 2.2 副瓣自卫距离

取雷达与干扰机的典型参数如表 2 所示,计算 可得主瓣接收干噪比 α<sub>i</sub> 可达 10<sup>6</sup> 量级。

干扰机参数			雷达参数			
$P_{\rm j}/{ m kW}$	$G_{\rm j}/{ m dB}$	$R_{\rm j}/{ m km}$	$G/\mathrm{dB}$	$B/\mathrm{MHz}$	$\lambda/{ m m}$	
1	10	300	30	2	0.25	

表 2 雷达与干扰机参数

图 3 给出了主瓣接收干噪比α<sub>j</sub>为 10<sup>5</sup> ~ 10<sup>8</sup> 时, 雷达副瓣自卫距离与平均副瓣电平的关系曲线。



图 3 副瓣自卫距离与主瓣接收干噪比、平均副瓣 电平关系曲线

由图 3 可以看到:

(1) 干扰越强,雷达副瓣自卫距离越小。

(2)当干噪比很高时,副瓣自卫距离与平均副 瓣电平呈线性关系:平均副瓣电平每降低4dB,副瓣 自卫距离增大1dB,约增加25.9%。

## 3 结束语

理论分析和计算表明,天线副瓣对雷达最大探测距离有一定的影响,对副瓣自卫距离有较大的影响。对警戒雷达而言,副瓣损耗因子对最大探测距离的影响很小,一般可忽略不计。对引导雷达而言, 天线副瓣较低时(平均副瓣电平优于-30dB),副瓣 损耗因子对最大探测距离的影响可忽略不计;天线 副瓣较高时(平均副瓣电平-27~-20dB),副瓣 损耗因子在1~3.5dB之间,计算雷达最大探测距 离时应予考虑。对所有雷达而言,副瓣电平每降 低4dB,副瓣自卫距离均增大1dB。本文分析结论 对雷达总体设计及探测性能分析计算有一定的参 考价值。

## 参考文献:

- [1] 张祖稷,金林,束咸荣. 雷达天线技术[M]. 北京:电子 工业出版社,2007.
- [2] 郦能敬,王被德,沈齐. 对空情报雷达总体论证——理 论与实践[M]. 北京:国防工业出版社,2008.
- [3] Skolnik M I. 雷达手册[M]. 王军,林强,米慈中,等 译. 北京:电子工业出版社,2003.
- [4] 南京电子技术研究所. 雷达系统分析与建模[M]. 北京:电子工业出版社, 2012.
- [5] 李刚. 高增益低副瓣卡塞格伦天线设计[J]. 雷达科 学与技术, 2010, 8(6):568-570.
  LI Gang. Design of a High Gain and Low Sidelobe Cassegrain Antenna[J]. Radar Science and Technology, 2010, 8(6):568-570. (in Chinese)
- [6] 熊毅,符伟,钱林,等. 有源相控阵天线自动测试系统 设计 [J]. 雷达科学与技术, 2012, 10(5):561-564.
  XIONG Yi, FU Wei, QIAN Lin, et al. Design of Automatic Testing System for Active Phased Array Antenna[J]. Radar Science and Technology, 2012, 10 (5):561-564. (in Chinese)
- [7] 潘妍妍,邓维波. 低峰值旁瓣电平稀布阵综合算法研究[J]. 雷达科学与技术, 2013, 11(3):290-294.
  PAN Yan-yan, DENG Wei-bo. Study on Sparse Arrays Synthesis with Low Peak Side-Lobe Level[J].
  Radar Science and Technology, 2013, 11(3):290-294.
  (in Chinese)
- [8] 钟华,束咸荣. 论雷达天线旁瓣电平指标的确定[J]. 现代雷达, 2007, 29(7):12-18.

## 作者简介:



董鹏曙 男,1965年生于湖北罗田, 教授、硕士生导师,主要研究方向为雷 达装备发展与运用。

E-mail:general\_dps@163.com