

中国分类号:TN971.3

文献标志码:A

文章编号:1674-2230(2011)02-0041-04

三维告警测角系统的天线布局研究

谢雪康

(电子信息控制重点实验室,成都,610036)

摘要:相对于常规的告警比幅测向系统,三维告警不仅要测量目标的方位角,还需要测量目标的俯仰角,其比幅天线布局不同。通过对比计算三维告警和常规两维告警覆盖的立体角,从理论上分析了两种条件下比幅测向天线数量的区别。并在此基础上,提出了一种三维告警测角系统天线的布局方式,并说明了这种布局方式的优点。

关键词:三维告警;立体角;比幅测向;天线布局

Research on Antennas Distribution to the Top Warning Amplitude-Comprised DF System

XIE Xue-kang

(Science and Technology on Electronic Information Control Laboratory, Chengdu 610036, China)

Abstract: The 3D warning system is different from the conventional warning system. It has to measure the elevation angle and the azimuth, so the deployment of their antennas is different. The solid angles of the two kinds are calculated and compared, the differences in DF antenna numbers and deployment are analyzed theoretically. Then a particular DF antennas distribution is put forward, and the excellence of the way is shown.

Key words: 3D warning; solid angle; amplitude-comprised DF; antennas distribution

1 引言

面对顶空攻击威胁,需要考虑告警的三维测角。本文首先说明了比幅测向系统的组成和单脉冲比幅测向原理,强调了告警灵敏度对天线增益等参数的要求。由于天线增益与天线覆盖空域立体角直接相关,因此在此基础上,从三维告警和常规告警覆盖立体角的对比计算入手,从理论上分析了两种条件下比幅测向天线数量的关系和不同,然后提出了一种三维告警比幅测向系统天线的布局方式。

2 比幅测向系统的组成和原理

单个脉冲的到达角测量可以采用比幅和比相

等方法^[1-5],其中全向单脉冲比幅测向系统因其对各种天线函数的适应能力较强、截获概率较高和截获时间较短的特点而得到广泛应用。

全向单脉冲比幅测向系统组成和工作原理示意图如图 1 所示。

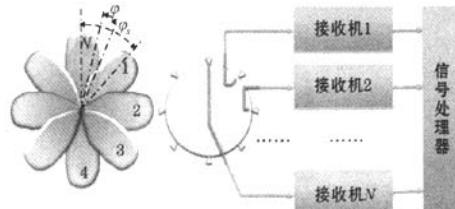


图 1 全向单脉冲比幅测向系统组成和工作原理

全向单脉冲比幅测向系统由 N 个比幅测向

天线、 N 个比幅测向接收机和1个信号处理器组成。比幅测向天线输出微波信号给比幅接收机,比幅接收机输出检波对数视放信号给信号处理器,信号处理器对该信号进行处理、采集后,完成比幅信号处理,最后得出信号到达角。

N 个比幅测向天线均匀放置在方位 360° 方位内,相邻两个天线轴线之间的夹角 $\varphi_s = 360^\circ/N$ 。设天线方向图 $F(\varphi)$ 满足对称性和单调性,3dB波束宽度为 φ_r 。

设雷达位于两个天线之间,且偏离两天线等信号方向的夹角为 φ ,两个天线接收的信号经过各自振幅响应为 K_i 和 K_j (图1中 $i = N, j = 1$)的接收通道,输出脉冲的对数包络信号为 $S_i(t)$ 和 $S_j(t)$ 。则两个通道比幅结果 Δ 为:

$$\Delta = 10(S_i(t) - S_j(t)) = 10\lg\left[\frac{K_i F(\varphi_s/2 - \varphi)}{K_j F(\varphi_s/2 + \varphi)}\right] \quad (1)$$

为了简化分析,我们假设各通道振幅响应近似相等,即 $K_i \approx K_j$ 。则 Δ 进一步简化为:

$$\Delta = 10\lg\left[\frac{F(\varphi_s/2 - \varphi)}{F(\varphi_s/2 + \varphi)}\right] \quad (2)$$

显然,到达角 φ 的测量与相邻天线的比幅结果、天线参数等直接相关。

两个通道要进行比幅,其比幅接收天线输出还要满足灵敏度 $P_{r\min}$ 要求。

距离雷达 R 处的功率密度 ρ_t 可以表示为^[6-7]:

$$\rho_t = \frac{P_t G_t}{4\pi R^2} \quad (3)$$

式中, P_t 为雷达发射功率, G_t 为雷达发射天线增益。

如果接收天线对入射场的极化是匹配的,则接收天线输出的功率 P_r 为:

$$P_r = \rho_t A_e = \frac{P_t G_t}{4\pi R^2} \frac{G \lambda^2}{4\pi} = \frac{P_t G_t G \lambda^2}{(4\pi R)^2} \quad (4)$$

式中, A_e 为接收天线的有效面积, G 为接收天线增益, λ 为雷达信号波长。

显然,接收天线输出要满足灵敏度 $P_{r\min}$ 要求,则在雷达参数和告警距离一定的条件下,接收天线增益必须满足最小增益 $G_{r\min}$ 要求。

综合考虑天线最小增益和告警空域要求等,确定天线参数、数量和空间放置方式,就完成了告

警天线的布局设计。

3 告警空域立体角和天线数量分析

三维告警和常规告警分别对来自顶空空域和侧面空域的雷达信号进行告警。

三维告警和常规告警空域示意图如图2所示。

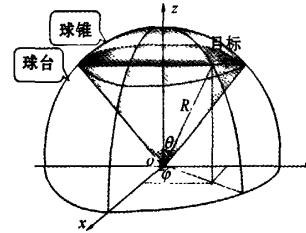


图2 三维和常规告警空域示意图

可以看到,半球空间分为球锥和球台两部分,分别对应三维告警和常规告警空域。

球锥部分对应三维告警空域。在图2所示球坐标系中,其表面积积分可以表示为:

$$S_{\text{球锥}} = 4 \int_0^{\varphi_1} \int_0^{\theta_1} R^2 \sin\theta d\theta d\varphi \quad (5)$$

式中, φ_1 为球锥表面在第一象限覆盖的方位角, θ_1 为球锥表面在第一象限的俯仰角。取一个应用场景,假设 $\varphi_1 = \pi/2, \theta_1 = \pi/4$ 。

则球锥表面积可以表示为:

$$S_{\text{球锥}} = 4 \int_0^{\pi/2} \int_0^{\pi/4} R^2 \sin\varphi d\theta d\varphi = 0.586\pi R^2 \quad (6)$$

因此,球锥对应的三维告警空域立体角 $\Omega_{\text{球锥}}$ 为 0.586π 。

球台部分对应常规告警空域。在图2所示球坐标系中,其表面积积分可以表示为:

$$S_{\text{球台}} = S_{\text{半球}} - S_{\text{球锥}} = \frac{4\pi R^2}{2} - 0.586\pi R^2 = 1.414\pi R^2 \quad (7)$$

因此,球台对应的常规告警立体角 $\Omega_{\text{球台}}$ 为 1.414π 。

下面分析告警天线数量。为了简化分析,我们假设如下限制条件^[8]:

①天线的功率能量全部集中于3dB波束宽度内;②在3dB波束宽度内,能量均匀分布。

由于天线增益 G_t 定义为接收方向辐射强度与平均强度的功率比,所以在限制条件下 G_t 可表

示为：

$$G_r = \frac{P/\Omega}{P/4\pi} = \frac{4\pi}{\Omega} \quad (8)$$

显然,当接收天线增益满足最小增益 $G_{r\min}$ 要求时,接收方向上天线覆盖的立体角为最大立体角 Ω_{\max} ,对应 3dB 波束宽度 Ω_{3dB} 。

告警空域立体角对应的波束位置数 n 可以表示为^[9]:

$$n = \frac{\Omega_{\text{探测空域}}}{\Omega_{3dB}} \quad (9)$$

显然,当 Ω_{3dB} 相同时,探测空域立体角不同,则对应的波束位置数不同。

因此当三维告警和常规告警的接收天线增益都为 $G_{r\min}$,且接收天线的 3dB 波束宽度刚好全部覆盖告警空域对应的球锥立体角和球台立体角时,三维告警的接收天线个数 $n_{\text{顶视}}$ 和常规告警的接收天线个数 $n_{\text{侧视}}$ 可以分别表示为:

$$n_{\text{顶视}} = \frac{\Omega_{\text{球锥}}}{\Omega_{3dB}} \quad (10)$$

$$n_{\text{侧视}} = \frac{\Omega_{\text{球台}}}{\Omega_{3dB}} \quad (11)$$

因此, $n_{\text{顶视}}$ 和 $n_{\text{侧视}}$ 之比如下:

$$\frac{n_{\text{顶视}}}{n_{\text{侧视}}} = \frac{\Omega_{\text{球锥}}}{\Omega_{\text{球台}}} = \frac{0.586\pi}{1.414\pi} \approx 0.414 \quad (12)$$

如图 1 所示,当常规告警采用 8 个告警接收天线时,则三维告警只需要 3.3 个告警接收天线。

4 三维告警天线布局研究

我们进一步通过表面移动覆盖法验证第三节的分析结果。图 2 所示的三维和常规告警空域示意图可以用俯视和主视示意图表示,如图 3 所示。

图 3 中,常规空域告警方位角范围为 $0^\circ \sim 360^\circ$,俯仰角范围为 $67.5^\circ \pm 22.5^\circ$ 。8 个比幅测向天线均匀分布在 360° 的圆周上,如 b_2 点,每个天线中心轴俯仰角指向 θ 均为 67.5° 。

设三维空域告警方位角范围为 $0^\circ \sim 360^\circ$,俯仰角范围为 $22.5^\circ \pm 22.5^\circ$ 。且三维告警采用的比幅测向天线与常规告警相同时,则三维告警天线覆盖的告警空域与常规告警天线覆盖的告警空域可以简化分析如下:

由于弧线 $b_1 b_2 b_3$ 的长度和弧线 $b_3 b_4 b_5$ 的长度相等,因此将常规告警空域表面 $a_1 b_1 c_1 c_3 b_3 a_3$

a_1 向三维告警空域移动时,可覆盖三维告警空域表面 $a_3 b_3 c_3 b_5 a_3$,满足三维告警全空域覆盖要求。此时,常规告警空域表面的弧线 $a_1 b_1 c_1$ 、 $a_2 b_2 c_2$ 和 $a_3 b_3 c_3$ 分别覆盖三维告警空域表面的弧线 $a_3 b_3 c_3$ 、 $a_4 b_4 c_4$ 和点 b_5 。

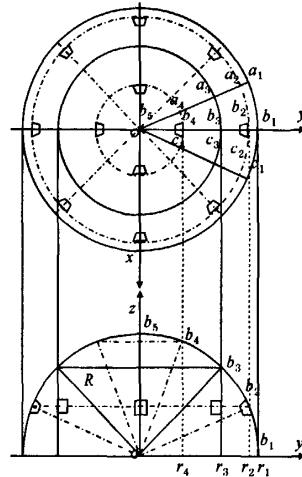


图 3 告警空域的俯视和主视示意图

显然,此时三维告警的天线个数为:

$$n_{\text{顶视}} = \frac{2\pi r_4}{2\pi r_2} \times n_{\text{侧视}} = \frac{2\pi r_4}{2\pi r_2} \times 8 \quad (13)$$

r_i ($i = 1 \sim 4$) 如图 3 所示,其值如下:

$$r_1 = R \quad (14)$$

$$r_2 = R \cos 22.5^\circ = 0.92R \quad (15)$$

$$r_3 = R \cos 45^\circ = 0.71R \quad (16)$$

$$r_4 = R \cos 67.5^\circ = 0.38R \quad (17)$$

所以,三维告警的天线个数 $n_{\text{顶视}}$ 为 3.3,与第三节“告警空域立体角和天线数量分析”的分析结果基本一致,我们取 4 个。

采用四个接收天线的三维告警天线方向图的仿真示意图如图 4 所示。

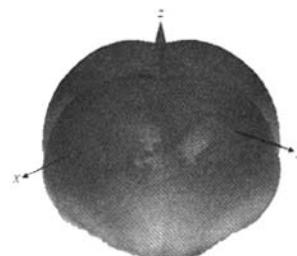


图 4 三维告警天线方向图的仿真示意图

显然,此时三维告警相邻天线3dB波束宽度在某个大于22.5°的俯仰角 θ_0 所在圆周上刚好相接,当 $\theta > \theta_0$ 时,相邻天线3dB波束宽度不能刚好相接,即相邻天线波束相接处的增益小于 G_{\min} ,在 $\theta = 45^\circ$ 时达到最小;当 $\theta < \theta_0$ 时,相邻天线3dB波束宽度重叠,在 $\theta = 0^\circ$ 时(即顶视顶点b5处),相邻天线3dB波束宽度完全重叠。

根据比幅测向原理,到达角的测量与相邻天线通道的比幅结果直接相关,由于在俯仰角较小的区域,顶视告警相邻天线3dB波束宽度重叠严重,此时在整个方位角覆盖范围内,相邻天线通道的比幅结果 Δ 变小,且具有相近的值,已基本不能满足方位角的比幅测向要求。

为了在满足告警接收灵敏度的同时,满足比幅测向要求,我们对三维告警天线布局进行调整,提出 $n+1$ 的布局方式:即单独设置一个天线对 $\theta < \theta_1$ 的空域1进行接收,其余 n 个天线对 $\theta_1 < \theta < \theta_2$ 的空域2进行接收。 θ_1 为三维告警空域内的一个俯仰角, θ_2 为三维告警空域的最大俯仰角。

采用这种布局方式后,由于三维告警空域被分成两个部分:空域1采用一个天线,空域2采用 n 个天线。空域1方位上虽然不测向,但是由于其覆盖的立体角较小且有其包含顶点的特殊性,通过灵敏度的判别就基本能够满足测向使用要求;空域2方位上采用比幅测向,由于大大降低了3dB波束重叠程度,因此基本满足比幅测向要求;此外利用空域1的1个天线和空域2的 n 个天线,可以实现俯仰角的比幅测向,进一步提高了告警能力。

需要强调的是,在实际工程应用中,由于系统的实际需求、天线的具体结构、微波通道和信号处理的差别,还需要进一步根据具体的要求进行细

化和优化设计。

5 结论

本文针对三维告警比幅测向需求,从理论上分析了三维告警和常规告警空域立体角的不同以及比幅测向天线数量的不同。在此基础上,通过立体角对应表面移动覆盖法和计算机仿真,验证了三维告警和常规告警比幅测向天线数量的关系,提出了一种 $n+1$ 的三维告警天线布局方式,这种方式具有明显优点:在满足告警接收灵敏度的同时,确定了天线数量和布局方式,不但满足了方位比幅测向要求,同时增加了俯仰比幅测向能力。

参考文献:

- [1] 赵国庆. 雷达对抗原理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2003.
- [2] WILEY R G. 电子情报雷达信号的截获[M]. 胡来招, 译. 成都: 电子对抗国防科技重点实验室, 2007.
- [3] 崔炳福. 隔波束比幅测向技术[J]. 电子对抗技术, 1995, 10(6): 1-8.
- [4] 杨利锋, 姜勤波. 比幅测向体制测向性能分析[J]. 电子信息对抗技术, 2007, 22(5): 7-9.
- [5] 易正红. 干涉仪测向系统信号到达角计算[J]. 电子对抗技术, 1994, 9(5): 21-24.
- [6] 林昌禄. 天线工程手册[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002.
- [7] SKOLNIK M I. 雷达手册[M]. 王军, 林强, 译. 北京: 电子工业出版社, 2007.
- [8] 高宇清. 空管雷达的功率问题[J]. 数学的实践与认识, 1994(1): 92-96.
- [9] STIMSON G W. 机载雷达导论[M]. 吴汉平, 译. 北京: 电子工业出版社, 2005.

欢迎订阅2011年《电子信息对抗技术》,全年定价60元

请向本刊代理征订点“天津联合征订服务部”订阅。

联系方法如下:

地址: 天津市大寺泉集北里别墅17号, 邮编: 300385

电话: 022-23962479, 022-23973378, 传真: 022-23973378

网址: www.lhzd.com, Email: lhzd@public.tpt.tj.cn, wms@lhzd.com

本刊订阅代号: 8265

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养, 更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果, 又能免除您舟车劳顿的辛苦, 学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲, 结合实际工程案例, 直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>