

定向天线合成取代全向侦察天线性能分析

王澍

(船舶重工集团公司723所,扬州225001)

摘要:分析了在 ESM 侦察设备中利用不同方位的多个定向天线合成的方法实现全向信号接收的性能,分析表明,这种方法在一定程度上可以取代全向天线或半全向天线,用来提供测频信号。

关键词:定向天线;合成;全向天线

中图分类号:TN971.1

文献标识码:B

文章编号:CN32-1413(2009)06-0024-03

Performance Analysis of Directional Antennas Synthesization Replacing Omni-direction Reconnaissance Antenna

WANG Shu

(The 723 Institute of CSIC, Yangzhou, 225001, China)

Abstract: This paper analyzes the performance of omni-direction signal reception performed by synthesizing several directional antennas with different directions in ESM reconnaissance equipment. It is indicated by analysis that this method can replace the omni-direction antenna or half omni-direction antenna in a certain extend, which can provide frequency measurement signal.

Key words: directional antenna; synthesization; omni-direction antenna

0 引言

众所周知,对于舰载 ESM 侦察设备来说,通常有全向和定向两套天线。全向天线接收的信号主要用来测频,在 360°方位范围内,不论哪个方位的雷达信号照射到天线上都可以接收到,从而实现 100%的截获概率。

定向天线则主要用来测向,根据测向体制的不同,定向天线有不同的排列方式。典型比幅测向是在 360°范围内排列 N 个喇叭,其轴线等间隔地指向不同方位,用来接收不同方位的信号,根据各天线接收到的信号幅度来判断信号的方位。

全向天线一般安装在桅杆的顶端,维修困难。定向天线一般安装在两舷。也有用两舷半全向天线代替全向天线,将它和定向天线共同安装在同一个天线座内,例如美国 AN/SLQ32-V 电子战系统就采用这种设计。

最近从国外某型舰载电子对抗设备中看到,其

侦察天线座的配置与众不同,十分简洁,只有 2 个完全相同的左、右舷侦察天线座;而且既没有全向天线也没有半全向天线,测频信号来自所有定向天线的合成;天线座安装高度适中,紧靠在接收处理机柜所在的舱室外,不仅传输电缆短、损耗小,而且可维修性很好。

本文对这种用定向天线信号合成来测频的方式的性能进行分析。通过分析,笔者认为这种代替全向天线的设计方法有许多优点,在一定条件下值得推广采用。

1 定向天线信号的合成方案

对于全向天线来说,其天线增益、频带宽度、环向不一致性等性能指标是十分重要的。考虑到天线仰角覆盖范围有一定的要求,全向天线的增益通常不高,其典型值为 -3~3 dB。采用双锥设计的全向天线频带宽度通常可以达到几个倍频程,环向不一致性主要取决于制造工艺,目前宽频带双锥全向天

线的环向不一致性典型值为3~5 dB(P-P)。

而定向天线的波束宽度和选择的波束数量有关,一般地说,相邻定向天线方向图的交叉点电平为3 dB左右,如果在360°方位范围内布置的波束数为N,则一般希望定向天线的3 dB波束宽度等于360°/N。

用定向天线信号的合成得到测频信号的方案,就是将各路定向天线接收的RF信号放大后按照奇数和偶数通道号分别由功分器合成相加,得到“奇数”和“偶数”两路RF信号,分别送往测频接收机。

考虑到相邻的定向天线方向图的交叉点为-3 dB左右,也就是说,相邻定向天线接收的信号幅度相差不大,如果将所有定向天线接收的信号直接相加,将发生严重的相位干涉,导致合成的方向图严重畸变,很多方位上可能接收不到信号,显然是不可取的。但是,若将所有奇数天线信号相加,所有偶数天线信号相加,问题就可以缓解。以奇数天线信号相加为例,由于相邻奇数天线之间隔了一个偶数天线,相邻奇数天线之间方向图的交点通常在-10 dB以下,合成的结果虽然仍会有干涉,但一个幅度大的信号和一个幅度小的信号之间的干涉,不论相位如何变化,合成的信号幅度虽然有起伏,但主要取决于幅度较大的信号。因此,干涉对幅度起伏的影响要小得多。

图1是这种定向天线信号的合成方案原理框图。作为例子,选择12方位比幅测向体制来说明。先将左、右舷天线座内部的奇、偶数天线接收到的信号用功分器合路,分别得到奇、偶两路RF信号输出。例如,将第0、2、4号天线的信号合路得到偶数输出,1、3、5路信号合路得到奇数输出。再通过单独的合路器将两舷的偶数输出合到一起,将两舷的奇数输出合到一起,形成奇、偶两路天线合成后的信号,分别送到接收机。

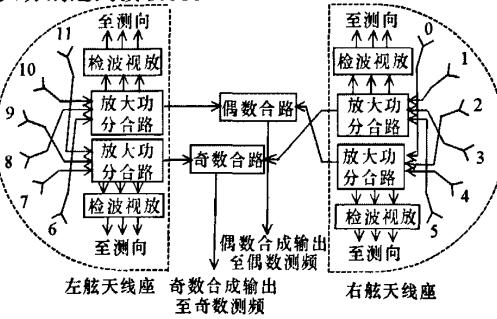


图1 定向天线信号合成得到测频信号的原理框图

每个频段都有2台独立的瞬时测频通道,分别对应奇数天线和偶数天线合成的信号测频。

2 性能分析

这种用奇数和偶数天线分别合成的方法提供测频信号,省去了全向天线或半全向天线,问题是,奇数和偶数天线信号综合后的“全向性”和“灵敏度”能否达到采用全向天线时的水平?

为了简化,本文选择最普通的矩形喇叭定向天线进行分析,假定喇叭口面电场幅度沿X轴呈余弦变化、沿Y轴均匀分布,且相位相同时,根据文献[3],得到H面方向图函数为:

$$F_H = \frac{\cos(\frac{\pi D_x}{\lambda} \sin \theta)}{1 - (\frac{2D_x}{\lambda} \sin \theta)^2} \quad (1)$$

式中:D_x为喇叭口面沿X轴方向的宽度;λ为信号波长;θ为偏离喇叭轴线的角度,-90°<θ<90°。

按照F_H=0.707可以算出H面方向图下降3 dB点的角度:

$$\theta_{0.5H} = \sin^{-1}(\frac{\lambda}{\pi D_x} 1.87) \approx \frac{1.87\lambda}{\pi D_x} \text{ (rad)} \quad (2)$$

下面针对12方位比幅测向体制来分析,这样做并不会失去普遍意义。12只喇叭间隔30°排列。天线半功率点为15°(0.2618 rad),因此 $\frac{D_x}{\lambda} = 2.274$,代入式(1)得到这种喇叭的方向图函数为:

$$F_H = \frac{\cos(7.144 \sin \theta)}{1 - (4.548 \sin \theta)^2} \quad (3)$$

以上是将天线的轴线方向置于0°,如果将天线的轴线方向置于θ_z,则(3)式变成:

$$F_H = \frac{\cos[7.144 \sin(\theta - \theta_z)]}{1 - [4.548 \sin(\theta - \theta_z)]^2} \quad (4)$$

对于12方位比幅测向,各个天线轴线方位分别为:

$$\theta_{zi} = 15^\circ + 30^\circ \times i, i = 0, 1, 2, \dots, 11$$

代入式(4)得到:

$$F_{Hi} = \frac{\cos[7.144 \sin(\theta - 15^\circ - 30^\circ \times i)]}{1 - [4.548 \sin(\theta - 15^\circ - 30^\circ \times i)]^2} \quad (5)$$

式中:F_{Hi}为第i个天线的方向图函数,i=0,1,2,...,11。

将奇、偶数天线接收到的信号用功分器分别合路时,不仅要考虑幅度,还要考虑相位因素。由于相位因素十分复杂,和空间接收的路程及馈线电缆长度都有关。为了简化,只考虑两种极端情况:一种是

各天线接收的信号相位相同,另一种是各天线接收的信号相位相反。

第1种情况,各天线接收的信号相位相同,则奇、偶数天线合成的结果分别为:

$$F_{\text{奇同}} = F_{H1} + F_{H3} + F_{H5} + F_{H7} + F_{H9} + F_{H11} \quad (6)$$

$$F_{\text{偶同}} = F_{H0} + F_{H2} + F_{H4} + F_{H6} + F_{H8} + F_{H10} \quad (7)$$

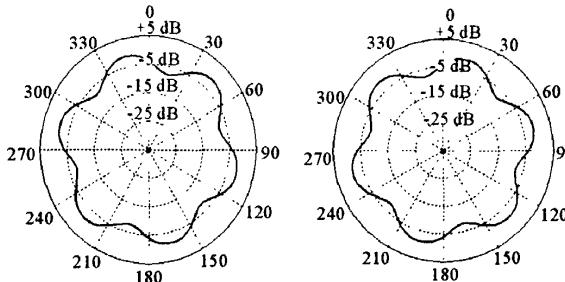
第2种情况,各天线接收的信号相位相反,则奇、偶数天线合成的结果分别为:

$$F_{\text{奇反}} = F_{H1} - F_{H3} + F_{H5} - F_{H7} + F_{H9} - F_{H11} \quad (8)$$

$$F_{\text{偶反}} = F_{H0} - F_{H2} + F_{H4} - F_{H6} + F_{H8} - F_{H10} \quad (9)$$

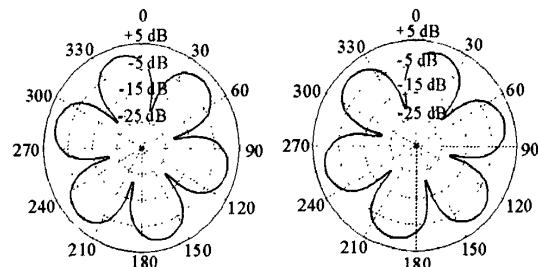
在实际使用中,按照图1的原理框图,只要奇数天线合成输出或偶数天线合成输出信号中有一个超过门限电平,测频接收机就可以启动工作,也就是说,奇数和偶数输出二者是“或”的关系。

式(6)奇数同相合成和式(7)偶数同相合成方向图曲线分别如图2(a)和图2(b)所示,式(8)奇数反相合成和式(9)偶数反相合成方向图曲线分别如图3(a)和图3(b)所示。为了分析合成以后的全向灵敏度随方位的变化,将式(6)和式(7)的曲线画在同一张图上,取二者最大值作为同相合成后总的方向图特性,如图4(a)所示。将式(8)和式(9)的曲线画在同一张图上,取二者最大值作为反相合成后总的方向图特性,如图4(b)所示。从图4(a)和图4(b)可以看出,其环向起伏都很小,图4(a)的环向起伏不超过2.6 dB(P-P),图4(b)的环向起伏不超过3.1 dB(P-P)。从图中也容易理解,在偶数合成信号较小的角度范围,奇数合成的信号反而较大,二者可以互补。



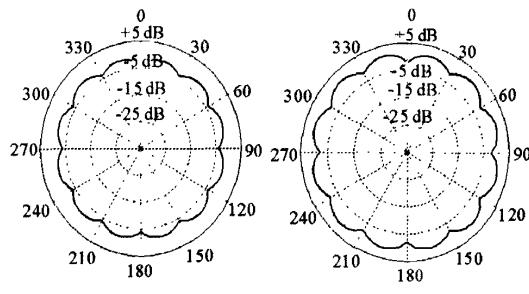
(a) 奇数同相合成方向图曲线 (b) 偶数同相合成方向图曲线

图2 同相合成方向图曲线



(a) 奇数反相合成方向图曲线 (b) 偶数反相合成方向图曲线

图3 反相合成方向图曲线



(a) 同相合成总的方向图曲线 (b) 反相合成总的方向图曲线

图4 合成总的方向图曲线

进一步分析表明,即使考虑了同相位和反相位的极端情况下互相比较,幅度起伏仍不超过5 dB(P-P),和目前全向天线的环向不一致性相当。由于定向喇叭天线的增益较高,尽管通过功分器合成会造成增益损失,实际等效的增益仍然略高于全向天线的增益。

3 结论

通过以上分析可以看出,采用奇、偶数定向天线分别合成的方法代替全向天线或半全向天线得到测频信号的方法是可行的,其综合幅度起伏和目前的全向天线的环向不一致性相当。由于省去全向天线或半全向天线可以提高设备适装性,改善可维修性。除此之外,还有一个十分重要的优势,由于全向天线信号的幅度-频率特性和定向天线信号的幅度-频率特性往往有较大区别。例如,定向喇叭的增益随着频率的升高而增加,而双锥全向天线的增益基本不随频率变化,甚至由于损耗影响,实际增益还会随着频率的升高而略有下降。由于全向和定向天线接收信号的幅度-频率特性不同,给接收机门限设计增加许多麻烦。采用定向天线合成的方法代替全向天

(下转第42页)

式中: $\theta(n) = 4.75\sqrt{n} + 1.638 - \sqrt{1.638n + 15.56\sqrt{n} + 2.683}$ 。

在 Matlab 下编程进行仿真, 得到图 2。

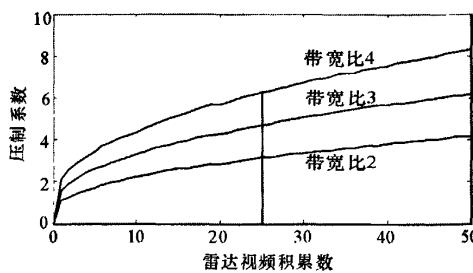


图 2 不同带宽射频干扰下的雷达压制系数变化图

由图 2 可以看出, 压制系数 K_s 除了与虚警概率 P_f 有关, 还与带宽比有关, 也即与进入雷达的干扰功率有关, 此外还与雷达视频积累数 n 有关。当雷达视频积累数一定, 带宽比越大, 压制系数越高, 干扰效果越差。射频噪声带宽越宽, 进入雷达的干扰功率就越小, 压制系数就变大, 干扰效果就不理想。所以要对雷达进行干扰, 首先就要探测到雷达的参数, 尤其是带宽。事实证明, 采取窄带瞄准式压制干扰能取得较好的干扰效果。然而当雷达采取捷变频技术抗干扰时, 射频噪声的带宽没有对准雷达的频点, 干扰效果就会明显降低。

下面将采用 2.3 所介绍的噪声干扰效果评估准则中的“烧穿距离”来对噪声干扰效果进行定量分析: 设有 1 部工作频段为 37.5 GHz 的雷达和 1 部远距离噪声干扰机, 参数为: $P_r = 50 \text{ kW}$, $P_i = 2 \text{ kW}$, $G_r = 40 \text{ dB}$, $G_a = 10 \text{ dB}$, $G_i = 13 \text{ dB}$, $\sigma = 3 \text{ m}^2$, $R_i = 300 \text{ km}$, $\Delta f_i = 4 \text{ MHz}$, $\Delta f_r = 80 \text{ kHz}$, 各参数的定义见 2.3 的介绍。在 Matlab 下编程进行仿真, 得到图 3, 即求出雷达的烧穿距离。

(上接第 26 页)

线或半全向天线, 就可以避免这种幅度-频率特性不同的问题, 因为它们来自同一种定向天线, 幅度-频率特性相同, 在接收机门限设置时可以更为合理。

因此, 笔者认为, 这种代替全向天线的设计方法有许多优点, 在一定条件下值得推广采用。

由图 3 知, 当噪声干扰应用于雷达天线主波束时, 干扰机的最小隐蔽距离(即雷达烧穿距离)为 55 km。在实际作战中, 作为干扰机而言就是尽量降低这个距离以便更好地掩护自己, 从而完成任务。

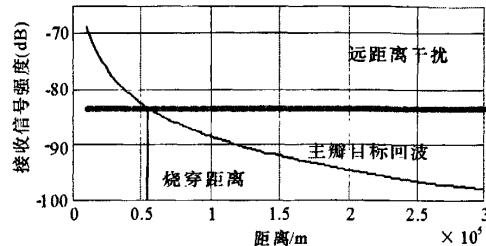


图 3 雷达烧穿距离

综合以上对噪声干扰的几种干扰效果评估方法的定义分析, 可以看出它们都是基于功率准则来对干扰噪声进行效果评估的。其主要依据目标回波信号功率和干扰噪声的功率关系, 在一定的检测概率下, 干扰刚好失效或者雷达能发现目标时的距离即为评价干扰效果的依据。由于压制系数仅考虑了干扰信号与目标回波信号的关系, 因此用它来衡量干扰机的干扰性能不全面。在实际评估中还是采用烧穿距离来衡量干扰设备的干扰效果。

参考文献

- [1] 邵国培, 曹志耀, 倪忠仁. 电子对抗作战效能分析 [M]. 北京: 解放军出版社, 1998.
- [2] 李滔. 雷达干扰抗干扰效果评估准则与实现 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2001.
- [3] 薛利敏, 张洪向, 李敏勇. 力效准则的电子战干扰效果度量的研究 [J]. 火力与指挥控制, 2004(3): 58-60.
- [4] 李朝, 张巨泉. 雷达抗干扰效能评估理论体系研究 [J]. 航天电子对抗, 2004(1): 30-33.
- [5] 何芳. 基于功率准则的多假目标干扰效果分析 [J]. 电光与控制, 2007(12): 125-126.
- [6] 周怀军, 丁士援. 噪声干扰条件下雷达检测概率分析 [J]. 舰船电子对抗, 2007(12): 43-45.

参考文献

- [1] 胡来招. 雷达侦察接收机设计 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.
- [2] 周东晓. 海天之间的电磁杀手——解密美国海军 AN/SLQ-32(V) 电子战系统 [J]. 环球军事, 2008(1): 50-51.
- [3] 谢处芳, 邱文杰. 天线原理与设计 [M]. 西安: 西北电讯工程学院出版社, 1985.

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>