

相控阵雷达天线阵面倾角优化选择研究

庞博清

中国电子科技集团公司第三十八研究所, 安徽 合肥

收稿日期: 2022年5月6日; 录用日期: 2022年6月6日; 发布日期: 2022年6月14日

摘要

本文从雷达系统设计的角度, 提出了一种基于雷达系统探测威力分析的天线阵面倾角优化方法。该方法创新性地将雷达系统设计与雷达阵面倾角进行了直接关联, 建立了阵面倾角和雷达探测威力之间的函数关系。通过理论推导和仿真分析, 对典型覆盖空域的雷达系统进行了阵面倾角优化。经优化分析, 相较于垂直阵面, 该方法得到的阵面倾角可帮助雷达系统节省6.6%的阵面规模。同时, 本文仿真分析了雷达覆盖仰角、高度、距离对雷达最优阵面的影响, 为雷达系统设计提供借鉴。

关键词

雷达系统设计, 雷达探测威力, 阵面倾角

Research on the Optimization of Elevation of Array Radar

Boqing Pang

The 38th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Hefei Anhui

Received: May 6th, 2022; accepted: Jun. 6th, 2022; published: Jun. 14th, 2022

Abstract

The paper proposes an optimization method of the elevation of antenna array based on the analysis of the detection power of radar system from the point of view of radar system design. The method builds the direct relationship between the radar system design and the elevation of the antenna creatively. The elevation is optimized for a typical radar system covering airspace by theoretical derivation and simulation analysis. The elevation obtained by this method can reduce 6.6% of the radar system scale, compared with the vertical array. Meanwhile, the paper simulates the

influence of radar coverage elevation, altitude, and range on the optimal elevation. It provides a reference for radar design.

Keywords

Radar System Design, Radar Coverage, Elevation of Antenna Array

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着雷达技术的发展和探测需求的提升,雷达系统设计也走向更为精细化的方向[1]-[6]。通过精细化设计不仅能够有效地实现雷达系统威力的提升,而且可有效控制雷达系统规模,降低使用、维护等方面的成本。尤其是随着雷达系统阵面规模的增加,其平台规模和系统复杂度将呈几何级数的速度增加,极大地增加了雷达系统的研制生产以及使用维护成本[7] [8]。通过对雷达系统设计过程中各参数进行优化,实现雷达系统性能的提升,对雷达系统的设计是一项非常重要的工作。

雷达阵面倾角是雷达系统设计中的一个基本参数[9]。雷达阵面倾角决定着雷达的扫描范围。在雷达系统覆盖空域相同的情况下,改变雷达阵面倾角将改变雷达的扫描范围,扫描范围的不同将直接决定阵面天线单元的间距,进而影响了雷达的增益。合理的阵面倾角能够有效发挥雷达的探测性能,增强雷达的探测威力。

在扫描波束栅瓣不进入实空间的前提下,雷达的扫描范围限制了天线单元间的最大间距,进而限制了雷达系统可实现的最大增益。同时,雷达阵面倾角也改变了波束扫描角度。扫描角度的不同也对雷达系统的增益产生影响。扫描角度偏离阵面法线的角度越大,雷达的增益下降就越大,波束的宽度也越宽。在一定角度范围内,雷达系统可实现的增益近似与扫描波束偏离法线角度的余弦值成反比关系[10] [11]。雷达系统在不同仰角上所需的探测威力是不同的。不同的阵面倾角下,雷达的增益的分布也是不同的。雷达阵面倾角通过改变雷达系统实现对雷达系统最大增益,以及增益和波束宽度在角度维的不同分布,进而影响雷达的探测威力。最优的雷达阵面倾角能够使得雷达在所需的覆盖区域内,所获得的综合增益是最大的,从而实现在相同阵面规模下,探测威力最远,或在相同探测威力需求下,所需的阵面规模最小。

本文从系统设计的角度对阵面倾角的优化选择开展了研究,建立了雷达阵面倾角、天线单元数量与雷达系统性能(威力)之间的函数关系,并通过数值仿真对特定的雷达覆盖空域需求下,雷达阵面倾角与雷达系统天线单元数量之间的关系。在此基础上,通过雷达俯仰覆盖角度、覆盖高度以及探测距离等对雷达阵面倾角的影响进行了仿真分析。

2. 理论原理

为了详细探究雷达阵面倾角、天线单元数量以及雷达威力之间的关系,首先对雷达系统的覆盖空域进行假定:角度覆盖范围为 $[0 \sim \alpha]$,高度覆盖范围为 $[0 \sim h]$,距离覆盖范围为 R ,阵面倾角为 φ ,如图1所示。

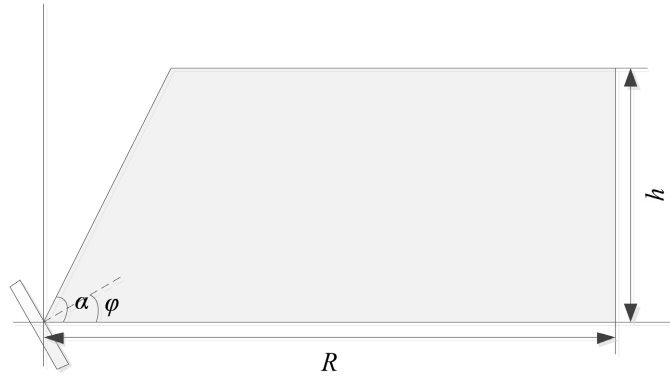


Figure 1. Zone of radar coverage
图 1. 雷达覆盖范围示意图

如图 1 所示，当雷达阵面倾角为 φ 时，雷达在俯仰维上的最大扫描角为： $\theta_{\max} = \max[\alpha - \varphi, \varphi]$ 。阵面俯仰维尺寸与俯仰最大扫描角的关系[12]为：

$$L = \frac{N\lambda}{1 + \sin \theta_{\max}}$$

其中， N 为俯仰维的天线单元数， λ 为雷达系统工作波长。在方位维尺寸固定的情况下，阵面增益和俯仰维的尺寸成线性相关：

$$G = a_1 \cdot L$$

其中， a_1 为相关系数。相应地，不同仰角的增益可表示为：

$$G_\theta = G \cos(\theta - \varphi)$$

其中， θ 为天线阵面的扫描角，满足 $\theta \in [-\varphi, \alpha - \varphi]$ 。

当雷达扫描角为 θ 时，根据雷达方程[13]可知：

$$\begin{aligned} R_\theta^4 &= \frac{P_t \tau G_\theta^2 \sigma \lambda^2 F_t^2 F_r^2 M}{(4\pi)^3 k T_s D_0(1) B_n L} \\ &= a_1^2 \frac{P_t \tau \sigma \lambda^4 F_t^2 F_r^2}{(4\pi)^3 k T_s D_0(1) B_n L} \cdot \frac{N^2 \cos^2(\theta - \varphi) M_\theta}{(1 + \sin \theta_{\max})^2} \end{aligned}$$

其中， P_t 为平均峰值功率， τ 为脉冲宽度， σ 为目标雷达散射面积， F_t 和 F_r 为方向图传播因子， k 为玻尔兹曼常数， T_s 为接收系统噪声温度， $D_0(1)$ 为单脉冲可见度系数， B_n 为接收机噪声带宽， L 为系统损耗因子， M_θ 为脉冲积累数量。在雷达系统，收发通道性能不变的情况下，平均峰值功率与阵面单元数成正比；即有

$$P_t = N \cdot P_{t_single}$$

其中， P_{t_single} 为单通道平均峰值功率，在这里， P_{t_single} 可视为是一个固定值。在脉冲重复频率固定时，脉冲积累数量与其驻留时间成正比，即有

$$M_\theta = a_2 t_\theta$$

其中, a_2 为比例系数, 可视为一个常数, t_θ 为驻留时间。

通过上述分析, 将雷达方程中与阵面倾角选择无关的变量进行了分离, 并将其视为常数。在本文中, $a_1^2 a_2 P_{t_single} \tau \sigma \lambda^4 F_t^2 F_r^2 / (4\pi)^3 k T_s D_0(1) B_n L$ 可视为是常数, 因此可得:

$$R_\theta^4 = A \cdot \frac{N^3 \cos^2(\theta - \varphi) t_\theta}{(1 + \sin \theta_{\max})^2}$$

其中, $A = a_1^2 a_2 P_{t_single} \tau \sigma \lambda^4 F_t^2 F_r^2 / (4\pi)^3 k T_s D_0(1) B_n L$ 。

不同角度达到公式中所示的探测威力所需的时间为

$$t_\theta = \frac{1 (1 + \sin \theta_{\max})^2 R_\theta^4}{A N^3 \cdot \cos^2(\theta - \varphi)}$$

根据空域覆盖假定, 雷达在不同角度的探测威力需求可表示为:

$$R_\theta = \begin{cases} R/\cos(\theta), & \theta \leq \arctan\left(\frac{h}{R}\right) \\ h/\sin(\theta), & \arctan\left(\frac{h}{R}\right) < \theta \leq \alpha \end{cases}$$

在方位维尺寸不变的情况下, 雷达阵面增益和俯仰波束宽度成反比, 即有:

$$\theta_{el} = \frac{a_3}{G_\theta} = \frac{1 + \sin \theta_{\max}}{N \lambda \cos(\theta - \varphi)}$$

其中, θ_{el} 为俯仰维波束宽度, a_3 为比例系数。因此, 雷达完成俯仰维扫描所需的时间可表示为:

$$\begin{aligned} T_{sum} &= \int_0^\alpha \frac{t_\theta}{\theta_{el}} d\theta = \frac{1}{A} \frac{\lambda}{N^2} \int_0^\alpha \frac{1 + \sin \theta_{\max}}{\cos(\theta - \varphi)} \cdot R_\theta^4 d\theta \\ &= \frac{1}{A} \frac{\lambda}{N^2} \int_0^{\arctan\left(\frac{h}{R}\right)} \frac{1 + \sin \theta_{\max}}{\cos(\theta - \varphi)} \cdot \frac{R^4}{\cos^4(\theta)} d\theta \\ &\quad + \frac{1}{A} \frac{\lambda}{N^2} \int_{\arctan\left(\frac{h}{R}\right)}^\alpha \frac{1 + \sin \theta_{\max}}{\cos(\theta - \varphi)} \cdot \frac{h^4}{\sin^4(\theta)} d\theta \end{aligned}$$

上式即为雷达系统天线阵面倾角与天线单元数量、覆盖空域、雷达扫描时间(数据率)之间的函数关系。

3. 数值仿真

在雷达系统设计中, 通常雷达的数据率和雷达系统的覆盖空域是固定且已知的。当雷达系统的覆盖空域和数据率固定时, 由上式可知, 天线单元数量与天线阵面倾角的关系为:

$$N = \sqrt{\frac{1}{A T_{sum}} \lambda \left[\int_0^{\arctan\left(\frac{h}{R}\right)} \frac{1 + \sin \theta_{\max}}{\cos(\theta - \varphi)} \cdot \frac{R^4}{\cos^4(\theta)} d\theta + \int_{\arctan\left(\frac{h}{R}\right)}^\alpha \frac{1 + \sin \theta_{\max}}{\cos(\theta - \varphi)} \cdot \frac{h^4}{\sin^4(\theta)} d\theta \right]}$$

本文对雷达的覆盖空域进行了假定。假定雷达的空域覆盖范围为 $R = 100$ 千米, $h = 5$ 千米, $\alpha = 45$ 度。对相同天线单元下不同阵面倾角的积分进行求解, 如下图 2 所示。其中, 水平轴为阵面倾角度, 垂直轴为对应的通道数。从图中可知, 当阵面最优倾角度为 22.5 度, 所需的通道数约为垂直阵面的 93.4%。

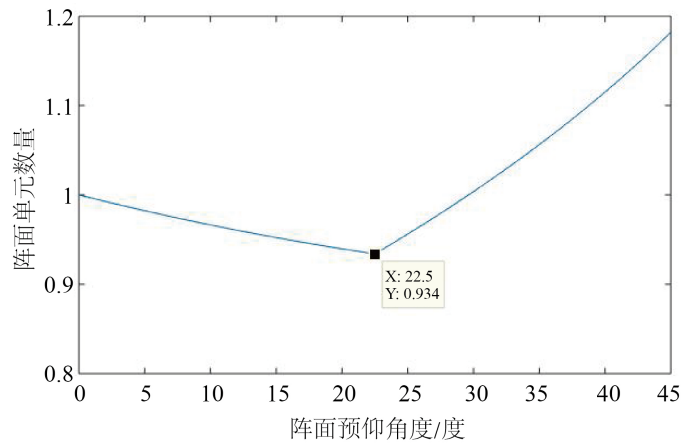


Figure 2. Number of antenna required for different array elevation
图 2. 不同阵面倾角所需的通道数量对比

目标飞行高度通常是以海平面为基准的，当雷达探测威力较大时，雷达覆盖区域如图 3 灰色区域所示。

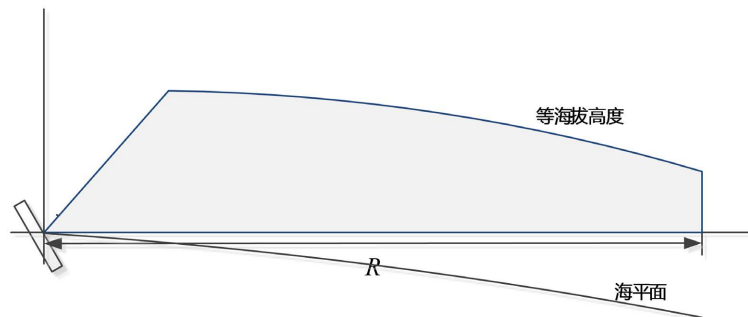


Figure 3. Zone of radar coverage with long distance detection
图 3. 以海平面为基准的雷达威力覆盖示意图

雷达在不同角度上的探测距离为

$$R_{\theta} = \min \left\{ \sqrt{R_d^2 \sin^2 \theta + h^2} + R_d \cos \theta - R_d \sin \theta, R \sin \theta \right\}$$

其中， R_d 为地球半径。假定雷达的空域覆盖范围为 $R = 400$ 千米， $h = 40$ 千米， $\alpha = 45$ 度。对不同倾角下所需的通道数进行仿真，结果如下图所示。

从图 2 和图 4 中仿真结果可知，当阵面倾角度为 22.5 度时，阵面所需的单元数量是最少的。其数量约为垂直阵面所需单元数量的 93.4%。阵面倾角度恰好为雷达覆盖角度的 1/2 时是最优的。

4. 最优阵面倾角影响因素分析

为进一步探究阵面最优倾角与雷达俯仰探测角度范围的关系，在探测高度不变的情况下，本文对不同探测距离下，最佳倾角和雷达俯仰探测角度之间的关系进行了仿真，结果如图 5 所示。

从图 5 中可以看出，对于不同的探测距离，阵面的最优倾角随雷达俯仰探测角度的变化趋势是相似的。当雷达俯仰探测角度角小时，阵面的最优倾角约是雷达俯仰探测角度的 1/2；随着雷达俯仰探测角度的增加，雷达的最优倾角将发生转折，阵面的最优倾角将不再是雷达俯仰探测角度的 1/2，而是随着雷达

俯仰探测角度的增加而呈线性下降。从中也可以看出，随着雷达探测距离的增加，雷达最优倾角的转折角度也越小。

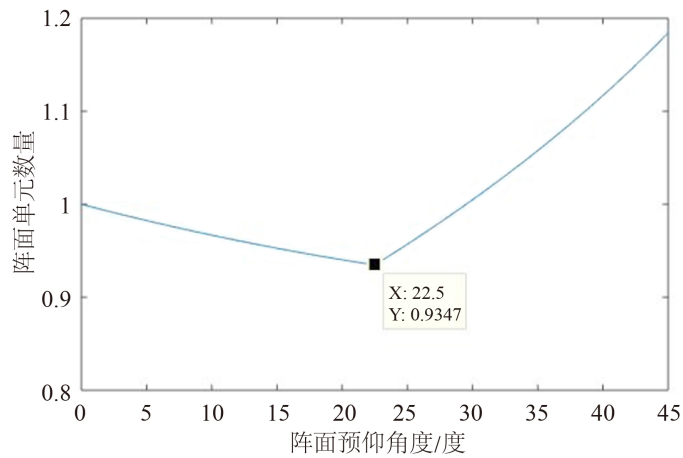


Figure 4. Number of antenna required for different array elevation with long distance detection

图 4. 远距离探测时，不同阵面倾角所需的通道数量对比

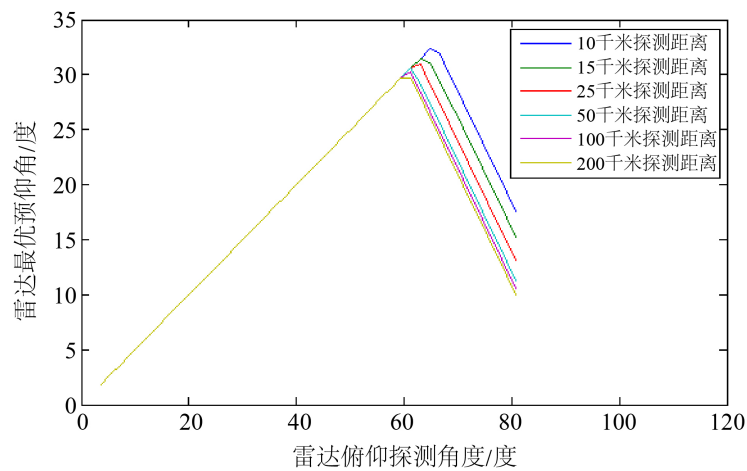


Figure 5. Relationship between the optimal elevation and the detection elevation with different range

图 5. 阵面最优倾角与雷达俯仰探测范围关系图

进一步地，本文对雷达探测距离、雷达俯仰覆盖高度与阵面最优倾角的关系进行仿真研究，仿真结果如图 6 和图 7 所示。图 6 给出了不同雷达俯仰探测角度下，阵面最优倾角与雷达探测距离的关系，可以看出当雷达俯仰覆盖角度在 60 度以下时，阵面最优倾角约为雷达覆盖角度的 1/2，当雷达俯仰覆盖角度为 70 或 80 度时，阵面的最优倾角随着雷达探测距离的增加而减小，且逐渐趋于某一固定值。图 7 为不同覆盖高度下，阵面最优倾角与雷达俯仰探测角度的关系，可以看出对于不同的雷达探测覆盖高度，雷达阵面最优倾角的曲线具有相似性，在雷达俯仰覆盖角度较小时，雷达阵面最优倾角随着雷达覆盖角度的增长而呈现线性增长，且最优阵面倾角约为雷达俯仰覆盖角度的 1/2，当雷达覆盖角度大于某个值时，雷达阵面的最优倾角的变化趋势将发生反转，但随着雷达覆盖高度的增加，雷达最优倾角的

转折角度也越小。

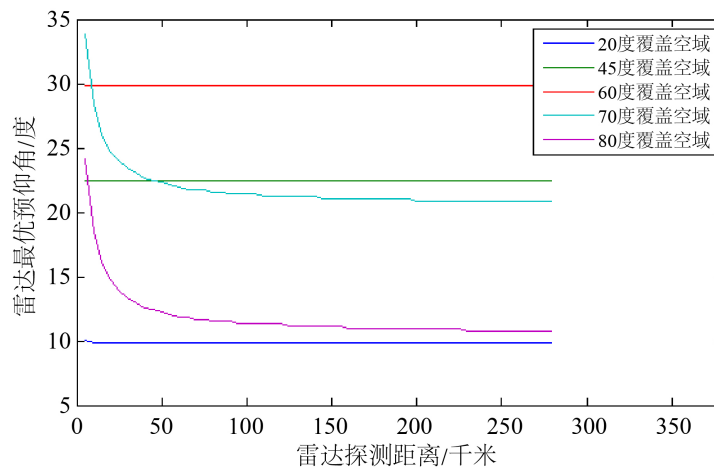


Figure 6. Relationship between the optimal elevation and the detection range

图 6. 阵面最优倾角与距离的关系

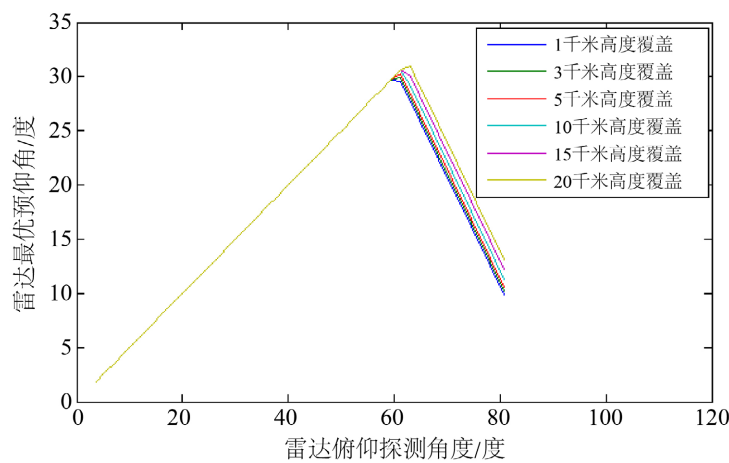


Figure 7. Relationship between the optimal elevation and the detection elevation with different height

图 7. 阵面最优倾角与角度的关系

5. 结论

本文从雷达系统设计的角度，对相控阵雷达的天线阵面倾角优化问题进行了研究，提出了一种以雷达系统设计为目标的阵面倾角优化方法。该方法实现了雷达系统性能与雷达阵面倾角的直接关联，根据雷达系统空域覆盖要求可直接实现雷达阵面倾角的选择确定，并进行了数值仿真试验验证。该研究课题为雷达系统设计师开展阵面倾角选择提供参考。本文主要目的为介绍一种阵面倾角选择方法，仅考虑了俯仰维的简单模型，其他更为复杂模型系统也可以借鉴该理论原理进行分析。

参考文献

- [1] 吴剑旗. 反隐身与发展先进米波雷达[J]. 雷达科学与技术, 2015, 13(1): 1-4.

-
- [2] 邵春生. 相控阵雷达研究现状与发展趋势[J]. 现代雷达, 2016, 38(6): 1-4+12.
- [3] 张春雁. 国外防空反导预警雷达发展分析[J]. 飞航导弹, 2013(4): 51-54+72.
- [4] 杨建宇. 雷达技术发展规律和宏观趋势分析[J]. 雷达学报, 2012, 1(1): 19-27.
- [5] 徐洋, 袁振涛, 朱景雷, 等. 网络化雷达现状及技术发展趋势[J]. 现代雷达, 2019, 41(10): 14-18.
- [6] 党弦, 江天, 成浩. 高精度测量雷达发展趋势[J]. 舰船电子对抗, 2021, 44(6): 22-25+55.
- [7] 王强, 朱文松, 魏文博, 等. 大型数字阵列雷达有源阵面系统的信息化管理[J]. 现代雷达, 2020, 42(8): 46-49.
- [8] 夏亮, 杨江平, 邓斌, 等. 大型相控阵雷达系统安全性分析和风险评价[J]. 现代电子技术, 2020, 43(9): 21-24.
- [9] 邵江达. 平面相控阵天线最佳阵面倾角和最大单元间距的确定[J]. 现代雷达, 1997, 19(1): 1-5.
- [10] 左群声, 徐国良, 马林. 雷达系统导论[M]. 第3版. 北京: 电子工业出版社, 2014.
- [11] 胡昌海, 王任, 陈传升, 等. 平面相控阵超大角度扫描的阵因子分析[J]. 物理学报, 2021, 70(9): 374-380.
- [12] 郭玉春, 方加云, 张光生. 现代天线设计[M]. 第二版. 北京: 电子工业出版社, 2018.
- [13] Skolnik, M.I. 雷达手册[M]. 第三版. 北京: 电子工业出版社, 2010.