

· 总体工程 ·

中图分类号: TN821

文献标志码: A

文章编号: 1004-7859(2010)10-0030-03

基于行波阵天线的频率分集技术应用方案

张 靖¹, 徐义华²

(1. 南京电子技术研究所, 南京 210039; 2. 空军驻江苏地区军事代表室, 南京 210002)

摘要: 传统频率分集技术应用于脉冲多普勒雷达, 可以利用频率间的非相参积累来提高雷达作用距离, 但提高幅度不大。文中介绍了一种方案, 利用行波阵天线频扫角, 通过合理规划雷达控制流程, 增加了各工作频率下单个脉冲重复频率的相参积累时间, 从而有效提高脉冲多普勒雷达作用距离。与传统方案对比, 该方案对雷达作用距离有更明显的提高。

关键词: 频率分集技术; 行波阵; 频率扫描角; 脉冲多普勒雷达

Application of Frequency Diversity Technique Based on Traveling-wave-fed Arrays

ZHANG Jing¹, XU Yi-hua²

(1. Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing 210039, China)

(2. Office of Air Force Military Affairs Delegate for Jiangsu Area, Nanjing 210002, China)

Abstract: The application of traditional frequency diversity technique can only improve operating range of pulse Doppler (PD) radar slightly, which utilizes non-coherent integration among frequencies. A novel scheme is proposed in this paper. By using frequency squint angle of traveling-wave-fed arrays and planning radar control flow properly, it can increase coherent-integration interval of single PRF for all frequencies and improve operating range of PD radar effectively. Compared with the traditional scheme, this scheme can increase radar operating range significantly.

Key words: frequency diversity technique; traveling-wave-fed arrays; frequency squint angle; PD radar

0 引言

对于采用大功率管发射机的脉冲体制雷达, 其发射管可提供的占空比仅在5%左右, 限制了雷达输出功率, 设计人员可以考虑采用频率分集的方式来改善这一限制。频率分集雷达能同时或相继地发射、接收和处理n($n \geq 2$)个不同频率的信号, 对目标进行探测。实际应用中, 频率分集雷达在一个重复周期内以不同载频同时或分时发射若干子脉冲, 在接收时, 再把多个频率的回波经不同的接收通道在信号处理中进行对齐处理。传统的频率分集雷达总体设计, 一般在接收与信号处理时对各个频率的回波信号进行非相参积累以提高信噪比^[1-3]。本文介绍一种利用频率分集技术和行波阵天线设计, 增加相参积累时间, 来提高目标回波信噪比, 进而提高雷达的作用距离, 增强探测威力的频率分集雷达总体设计方案。

1 原理介绍

基于行波阵原理实现的波导裂缝阵列天线, 裂缝

单元间距不等于 $\lambda_s/2$, 各辐射裂缝的反射波不会因叠加而产生大的输入驻波。裂缝间距不等于 $\lambda_s/2$ 引起的相位变化, 造成主波束偏离法线方向, 偏离的角度大小随频率变化, 从而产生频率扫描角^[4] (以下简称频扫角)。

根据相位变化可以推导出行波阵的频扫角计算公式, 具体推导过程为

$$\Delta d = d - \frac{\lambda_s}{2} \quad (1)$$

阵内裂缝间距引起的相位差

$$\Delta \Psi_1 = \frac{2\pi}{\lambda_s} \Delta d = \frac{2\pi}{\lambda_s} d - \pi \quad (2)$$

天线主波束偏移引起的相位差

$$\Delta \Psi_2 = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta \quad (3)$$

$$\Delta \Psi_1 = \Delta \Psi_2 \Rightarrow \theta = \arcsin \left(\frac{\lambda}{\lambda_s} - \frac{\lambda}{2d} \right) \quad (4)$$

式中: θ 为平板裂缝行波阵的频扫角; λ 为波在自由空间传播的波长; d 为辐射元间距; λ_s 为波导内的波长。

假定雷达设计为 360° 扫描, 速率为 n , 检测准则为 $2/4$ 准则, 波束宽度为 θ_{3dB} , 波束驻留时间为 $\theta_{3dB}/2\pi n$ 。工作频率分别为 f_1 和 f_2 , 取 $f_1 > f_2$, 对应天线的频扫角为 θ_1 和 θ_2 , 则 $\theta_1 < \theta_2$ 。频带内选择组合频率 f_1, f_2 , 使得 $\theta_2 - \theta_1$ 为波束宽度 θ_{3dB} 的整数倍, 如图 1 所示。

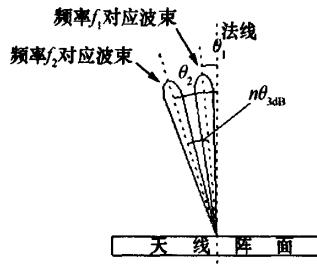


图 1 行波阵天线频扫角示意图

1.1 传统应用方案

通常的频率分集在 2 个频率下, 采用相同的脉冲重复频率 (PRF), TX_1 与 TX_2 工作频率为 f_1 和 f_2 , 如图 2 所示。



图 2 系统定时关系图

假定目标在相对于正北 θ_{az} 的方位, 在频率 f_1 对应的波束指向 θ_{az} 时, 频率 f_2 对应波束指向 $\theta_{az} - (\theta_2 - \theta_1)$ 。雷达在 2 个频率下的回波数据分别处理, 频率 f_1 的回波处理结果存入数据缓存区; 频率 f_2 的处理结果与缓存区中频率 f_1 在方位 $\theta_{az} - (\theta_2 - \theta_1)$ 时的处理结果进行相关, 相关处理的结果即雷达在方位 $\theta_{az} - (\theta_2 - \theta_1)$ 的检测结果。天线扫过角度 $\theta_2 - \theta_1$ 后, 频率 f_2 对应的波束指向 θ_{az} 位, 将此时雷达频率 f_2 的处理结果与缓存区中 f_1 在此方位下的处理结果进行相关处理, 相关处理的结果即雷达在方位 θ_{az} 处的检测结果。

1.2 新应用方案

新的设计方法将 $2/4$ 检测准则结合频率分集灵活运用。设工作频率 f_1 与 f_2 的频扫角差值 $\theta_2 - \theta_1$ 为波束宽度 θ_{3dB} 的 n 倍, n 为正整数。雷达在一个波束内发射 2 组不同的 PRF 脉冲, 相对于传统一个波束内 4 组脉冲, 每组脉冲的积累个数增加超过一倍。仍然假定目标在相当于正北 θ_{az} 的方位, 在频率 f_1 的波束指向 θ_{az} 时, 雷达发出 PRF1, PRF2 2 组脉冲, 天线扫过角度 $\theta_2 - \theta_1$ 后, 频率 f_2 对应的波束对准 θ_{az} 位, 此时雷达发出 PRF3, PRF4 2 组脉冲。将 θ_{az} 位上载频为 f_1 的 PRF1, PRF2 回波信号处理数据, 与载频为 f_2 的 PRF3,

PRF4 回波信号处理数据, 进行 $2/4$ 检测处理, 处理结果即雷达在方位 θ_{az} 处的检测结果。

为了能够做到在同一方位上均有 4 组 PRF 照射, 在系统调度时, 每隔 n 个波束转换一次 PRF 组合。以 n 为 3 作为示例, 其调度情况如图 3 所示。图中给出 9 个波束位置的系统波形调度组合, 以第 4 个波束位置为例, 当对应频率 f_1 的波束扫描到该波束位置时, 雷达发出 PRF3 与 PRF4 的波形组合, 此时, 对应 f_2 的波束扫描到第 1 个波束位置; 3 个波束位置后, 对应频率 f_1 的波束扫描到第 7 个波束位置, 此时, 发出 PRF1 与 PRF2 的波形组合, 对应 f_2 的波束恰好落在第 4 个波束位置; 这样, 在第 4 个波束位置就同时工作了 PRF1 ~ PRF4 4 组波形, 通过信号处理机对这 4 组发射波形的回波进行处理, 运用 $2/4$ 准则, 检测出目标信息。

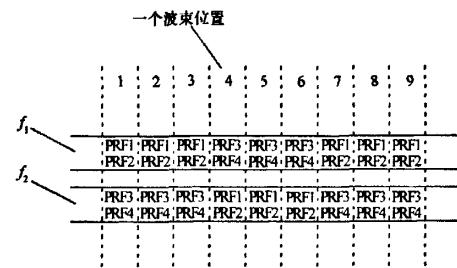


图 3 系统调度示意图

2 性能分析

以非频率分集雷达(即单频雷达)发现概率 P_d 为 0.5, 虚警概率为 10^{-6} 作为设计参数, 依然采用 $2/4$ 检测准则, 对传统频率分集使用方法与新的频率分集使用方法进行性能比较。

假设雷达采用 N/M 检测准则, 在已知单组脉冲检测概率时, 计算一个波束的发现概率, 通常

$$P_d = \sum_{n=N}^M C_M^n P_d^n (1 - P_d)^{(M-n)} \quad (5)$$

已知一个波束的发现概率, 借用式(5)可以推算出单组脉冲的检测概率, 单频雷达中, $2/4$ 准则, 发现概率 0.5, 其单组脉冲检测概率计算结果为 0.386。对于采用 2 个频点工作的雷达, 同一个波束位置有 2 次检测, 分别对应频率 f_1 和 f_2 的波束, 同样将发现概率 0.5 折算到单个频率对应的波束中, 其发现概率为 0.293; 再根据 $2/4$ 准则, 利用式(5)折算到单组脉冲, 检测概率为 0.268。

对于 Swerling I 型起伏的目标, 其检测概率、虚警概率与检测目标所需的信噪比之间存在以下关系,

$$P_d = P_f^{(1+SNR)} \quad (6)$$

式中: P_d 为单组脉冲的检测概率; P_f 为虚警概率; SNR 为检测目标所需的信噪比。

利用式(6)可以计算出, 单频雷达检测目标所需的信噪比为 11.3 dB; 传统双频频率分集雷达目标检测所需信噪比为 9.77 dB。由此不难看出, 频率分集传统用法对雷达作用距离的增加约为 1.53 dB。假如单频雷达作用距离为 300 km, 则双频频率分集雷达的作用距离可以推算到 327.6 km。

对于本方案中提出的频率分集方式, 由于在每个波位上存在 4 组脉冲, 2/4 准则, 发现概率 0.5, 其信噪比需求仍然为 11.3 dB。与单频雷达对比, 变化出现在积累时间上。相参积累雷达作用距离方程^[5-6]

$$R^4 = \frac{P_{av} G_t G_r \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 k T_0 (1/T_i) N_f SNR} \quad (7)$$

式中: P_{av} 为雷达发射信号的平均功率; G_t 为发射天线增益; G_r 为接收天线增益; σ 为雷达的目标截面积; λ 为雷达工作波长; $k = 1.380658 \times 10^{-23}$ Ws/K, 为玻尔兹曼常数; T_0 为接收系统的噪声温度; T_i 为积累时间或一组脉冲串的持续时间; N_f 为接收系统的噪声系数; SNR 为检测目标所需的信噪比。

由给出的雷达方程可知, 本方案提出的频率分集运用方式对单频雷达的性能改善, 体现在参数 T_i 上。积累时间的增加, 带来作用距离的提高。单频与频率分集相参积累对比, 如图 4 所示。

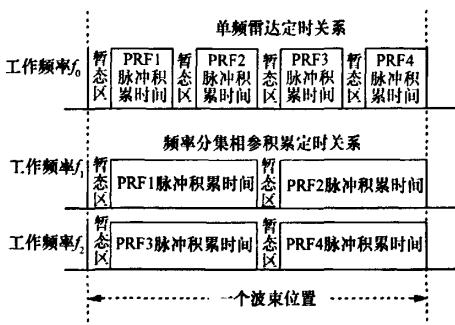


图 4 单频与频率分集相参积累对比图

由图 4 可知, 本方案中每个 PRF 对应的脉冲串积累时间, 是单频点雷达的 2.2 倍多, 即 3.4 dB。结合式(7)可简单推算, 如单频点雷达作用距离为 300 km, 则本设计方案雷达的作用距离可以推算到 365.4 km。

以上分析表明, 本方案对于频率分集的应用优于传统方法, 雷达的威力有较大的提高。

3 结束语

传统的频率分集雷达总体设计, 将系统中同时工作的不同频率间隔取大于一定数值, 以降低目标频率闪烁的影响。本文提出的应用方案, 在降低目标频率闪烁影响的同时, 将频率分集中的两个频率巧妙地结合使用, 可以较好地提高雷达威力, 对于类似 E-3A 体制的机载预警雷达有较好的应用前景。

参 考 文 献

- [1] 徐 钧. 机械扫描体制机载预警雷达的总体问题[J]. 现代雷达, 2005, 27(8): 4-6.
Xu Jun. System design issues for mechanically rotating airborne early warning radar [J]. Modern Radar, 2005, 27(8): 4-6.
- [2] 罗守贵, 金 林. 机载预警雷达的发展趋势分析[J]. 现代雷达, 2008, 30(12): 1-5.
Luo Shougui, Jin Lin. Development trend analysis on the airborne early warning radar [J]. Modern Radar, 2008, 30(12): 1-5.
- [3] 叶 杰, 刘志慧. 机载预警雷达共形阵应用技术分析[J]. 现代雷达, 2009, 31(7): 8-11.
Ye Jie, Liu Zhihui. Analysis of application of ABW radar with conformal array [J]. Modern Radar, 2009, 31(7): 8-11.
- [4] 张祖稷, 金 林, 束咸荣. 雷达天线技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
Zhang Zuji, Jin Lin, Shu Xianrong. Antenna technology of radar [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005.
- [5] Skolnik M I. 雷达手册[M]. 2 版. 北京: 电子工业出版社, 2003.
Skolnik M I. Radar handbook [M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003.
- [6] 丁鹭飞. 雷达原理[M]. 西安: 西北电讯工程学院出版社, 1984.
Ding Lufei. Principle of radar [M]. Xi'an: Publishing House of Northwest Institute of Telecommunication, 1984.

张 婧 男, 1980 年生, 工程师。研究方向为预警雷达系统总体设计。

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>