

引用格式: 娄昊, 张群, 朱丰, 等. 基于交错稀疏阵列优化的雷达-通信共享孔径方法[J]. 电光与控制, 2018, 25(2): 83-87. LOU H, ZHANG Q, ZHU F, et al. Radar/communication antenna aperture sharing based on staggered sparse antenna array optimization[J]. Electronics Optics & Control, 2018, 25(2): 83-87.

基于交错稀疏阵列优化的雷达-通信共享孔径方法

娄昊^{1,2}, 张群¹, 朱丰³, 卓琨⁴

(1. 空军工程大学信息与导航学院, 西安 710077; 2. 武警工程大学信息工程系, 西安 710086;
3. 国防大学, 北京 100091; 4. 中国人民解放军93995部队, 西安 710306)

摘要: 在稀疏阵列天线和交错子阵理论的基础上提出了雷达-通信天线共享孔径的新方法。分析了共享孔径下雷达和通信的关键指标, 明确了雷达阵列方向图的最大峰值旁瓣电平和多输入多输出通信系统的信道容量2个优化目标, 提出了给定阵元数及孔径大小条件下的阵元位置优化问题。在设置了偏好度后, 将二元优化问题转化为单目标优化问题, 提出了一种基于遗传算法的求解方法。仿真实验证明了所提优化方法的可行性, 给出了针对不同偏好度的优化曲线。

关键词: 稀疏阵列天线; 交错子阵; 共享孔径; 阵元位置优化; 遗传算法

中图分类号: TN955 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2018.02.017

Radar/Communication Antenna Aperture Sharing Based on Staggered Sparse Antenna Array Optimization

LOU Hao^{1,2}, ZHANG Qun¹, ZHU Feng³, ZHUO Kun⁴

(1. Institute of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China;
2. Information Engineering Department, Engineering University of CAPF, Xi'an 710086, China;
3. National Defense University, Beijing 100091, China; 4. No. 93995 Unit of PLA, Xi'an 710306, China)

Abstract: A new method of antenna aperture sharing for communication and radar system is presented on the basis of the sparse array antenna and staggered sub-array theory. An analysis is made to the key indicators of the radar and communications with a shared aperture. Two key indicators are chosen as optimization objectives: the maximum peak side-lobe level of the radar array pattern, and the communication channel capacity of Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) communication system. The array element position optimization problem under given array element number and aperture size is put forward. After setting a preference degree, the optimization problem is transformed into a single-objective optimization problem, and a solving method based on genetic algorithm is given. Simulations and analysis prove the feasibility of the proposed optimization method, and the optimization curves for different preference degrees are given.

Key words: sparse array antenna; staggered sub-array; antenna aperture sharing; array element position optimization; genetic algorithm

0 引言

当前,把雷达、通信、电子战等不同种类、不同用途的设备进行整合,构成一体化的电子系统已经成为一

种新的研究方向^[1],天线的共用是其中研究的重点。最直接的一种电子资源共享方案就是将天线分时共用,如美国雷声公司在 AN/APG77 型机载雷达上加装了一种通信调制解调器,实现了雷达图像的高速传输^[2],这种系统的不足是雷达和通信任务在时间上是冲突的,在通信的同时无法实施雷达探测及成像等任务;另一种方案是对天线孔径进行功能分割,不同的区域分配不同的任务,如美国海军提出的 AMRFC 方案^[3],将天线阵面划分为若干区域,可同时实现雷达、通信和电子战等功能,即所谓共享孔径天线技术。但

收稿日期:2017-03-20

修回日期:2018-01-04

基金项目:国家自然科学基金(61703412);陕西省自然科学基金(2015JM6306);武警工程大学基础研究项目(WJ20160132)

作者简介:娄昊(1984—),男,河南南阳人,博士生,研究方向为雷达通信一体化。

是将天线孔径只进行整体划分,势必造成各个功能可用孔径的减小,实际上降低了天线性能^[4]。

稀疏布阵和子阵交错技术的提出为共享天线孔径提出了新的解决方案。稀疏阵列是指为了达到特定的功能效果,从天线阵列中只选择部分阵元进行工作,形成相对于原天线阵列的稀疏阵。稀疏阵列采用较少的阵元即可在主要指标上达到原阵列的性能,可以节省阵列资源,在雷达和通信中都有应用^[5-6]。子阵交错技术则是在稀疏阵列的基础上,将两个以上的阵列交错放置,使得多个功能天线阵列可以交错共享同一个孔径,当前已经应用于雷达领域^[7-8],并且根据雷达性能参数要求提出了优化交错稀疏阵列的方法。

然而,在雷达-通信天线共享孔径方面,不同的功能定位决定了雷达和通信设备对天线阵列有着不同的要求,也就决定了在进行雷达-通信共享天线的设计时必须兼顾二者性能指标。本文针对雷达-通信交错稀疏阵列天线展开研究,明确了共享孔径下雷达和通信的关键指标参数,并针对这些指标提出了给定阵元数及孔径大小条件下的阵元位置优化方法,为解决雷达-通信共享孔径中的资源配置问题提出了解决思路。

1 共享孔径原理

1.1 稀疏阵列雷达的孔径综合技术

假设采用 M 个单元组成的线型阵列天线,阵元间距为 d 。对于第 m 个阵元来说,激励幅度为 $\{a_m\}$ 。若只选择其中 $m < M$ 个阵元处于工作状态,而其余的 $M - m$ 个单元空置,即形成 m 个单元的稀疏阵。为了方便分析,本文进行了如下设定:天线阵元间距相同,都为半波长;考虑到阵列的主瓣宽度与阵列的孔径成反比,在共享孔径的两端阵元应固定为雷达使用;波达方向为阵列法向。

一般线阵天线的辐射方向图可表示为

$$E(\theta) = \sum_{m=0}^{M-1} a_m \exp(jm d \cos \theta) \quad (1)$$

式中: $m = 0, \dots, M-1$ 表示阵元位置序号; a_m 为每个阵元的激励幅度; j 为复指数; d 为相邻阵元间距; θ 为阵列法线角度。现用天线标志位 $C_M = \{c_m\}$, $m = 0, \dots, M-1$, 表示每个单元具有两种工作状态: $c_m = 1$ 表示该位置单元工作; $c_m = 0$ 表示该位置单元不工作。若每个阵元的激励幅度 a_m 相同,则式(1)可以进一步表示为

$$E(\theta) = \langle C_M, F(\theta) \rangle = \sum_{m=0}^{M-1} c_m \exp(jm d \cos \theta) \quad (2)$$

式中: $F(\theta) = (1, \exp(jd \cos \theta), \dots, \exp(j(M-1)d \cos \theta))^T$; $\langle \cdot, \cdot \rangle$ 表示求内积。对于式(2)来说,天线标志位 C_M 决定的工作单元的阵元波束和阵元位置是影响输出天线方向图的关键因素。

除此之外,最大旁瓣增益是评价天线阵列的常用指标,最大相对旁瓣电平 $\max R_{SLL}$ 可表示为

$$\max R_{SLL} = 20 \lg \left[\max \left| \frac{\langle C_M, F(\theta) \rangle}{F_{\max}} \right| \right] \quad (3)$$

式中: F_{\max} 是主瓣峰值; θ 的取值区间需要排除主瓣区域。从式(3)可以看出,稀疏阵是对空间来波信号的非均匀采样,不能通过常规的傅里叶变换方法得到其峰值旁瓣的解析表达。

如果能将阵列中的雷达阵元和通信阵元交错放置,即形成所谓交错子阵,就可以提高天线孔径的利用率,实现雷达-通信对天线孔径的共享使用。此时阵元有 3 种状态,即雷达、通信 2 种工作状态和空置状态。

1.2 通信系统的阵列天线选择

采用阵列天线的不同阵元,构成近年来受到较多关注的多输入多输出(MIMO)通信系统,可在有限的功率和带宽条件下,增加系统信道容量^[9]。系统数据模型表示为

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{v} \quad (4)$$

式中: \mathbf{x} 为 $N_T \times 1$ 发射信号矢量; \mathbf{y} 为 $N_R \times 1$ 接收信号矢量; \mathbf{v} 为接收端 $N_R \times 1$ 零均值高斯白噪声矢量; \mathbf{H} 为 $N_R \times N_T$ 传输信道衰落矩阵。假设接收端已知信道矩阵 \mathbf{H} , 信道容量 C_s 可以表示为

$$C_s = \text{lb} \det \left(\mathbf{I} + \frac{\rho}{N_T} \mathbf{H}^H \mathbf{H} \right) \quad (5)$$

式中: \mathbf{I} 表示单位矩阵; $(\cdot)^H$ 表示矩阵复转置; ρ 表示接收端的信噪比。

理论上,在多径衰落环境中, MIMO 系统的信道容量随天线数的增加呈线性增加。但是当信道存在相关性时,通信性能出现较大幅度的下降。在相关信道下,合理进行天线选择可以影响信道容量。

考虑阵列天线为收发共用天线,根据文献[10]的研究,接收天线选择会降低信道容量,因此理论上较多的非相关天线阵元可以提高接收信道的容量。为了简化分析,此处仅将阵列天线作为接收方使用,假设与阵列天线对应的发射阵列不相关,则信道 $\mathbf{H} = \mathbf{R}_r^{1/2} \mathbf{H}_\omega$ 。其中, \mathbf{R}_r 为阵元间的相关矩阵, \mathbf{H}_ω 表示 0 均值、方差为 1 的随机矩阵。此时对 \mathbf{R}_r 进行特征值分解得到

$$\mathbf{R}_r = \mathbf{U}_r \mathbf{Q}_r \mathbf{U}_r^H \quad (6)$$

式中: \mathbf{U}_r 为酉矩阵; \mathbf{Q}_r 为对角阵,其对角元素为接收阵列相关矩阵特征值。则信道矩阵 $\mathbf{H} = \mathbf{R}_r^{1/2} \mathbf{H}_\omega = \mathbf{U}_r \mathbf{Q}_r^{1/2} \mathbf{U}_r^H \mathbf{H}_\omega$, 则容量公式

$$C_s = \text{lb} \det \left(\mathbf{I} + \frac{\rho}{N_T} (\mathbf{U}_r \mathbf{Q}_r \mathbf{U}_r^H \mathbf{H}_\omega)^H \mathbf{U}_r \mathbf{Q}_r \mathbf{U}_r^H \mathbf{H}_\omega \right) \quad (7)$$

当信噪比 ρ 较大时,

$$C_s = \text{lb} \det \left(\frac{\rho}{N_T} (\mathbf{U}_r \mathbf{Q}_r \mathbf{U}_r^H \mathbf{H}_\omega)^H \mathbf{U}_r \mathbf{Q}_r \mathbf{U}_r^H \mathbf{H}_\omega \right) =$$

满足 $f_1(\mathbf{x})$ 和 $f_2(\mathbf{x})$ 的最优解,这一类问题的优化解称为 Pareto 最优解。为了简化问题,此处通过加权的方法,将式(10)转化为如下单目标问题

$$\begin{aligned} \min f(\mathbf{x}) &= \alpha f_1(\mathbf{x}) + (1 - \alpha)f_2(\mathbf{x}) \\ \text{s. t. } \mathbf{x} &= (x_1 \ x_2 \cdots x_M) \end{aligned} \quad (14)$$

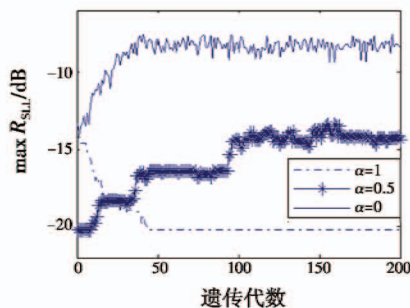
式中, $0 < \alpha < 1$ 表示权系数。在文献[12]中,已经证明式(14)问题的一个全局最优解必为式(10)问题的一个 Pareto 最优解。考虑到式(14)问题中的 $f_1(\mathbf{x})$ 和 $f_2(\mathbf{x})$ 都是非线性函数,需要采用一些启发式方法求解。近年来,遗传算法在寻求非线性优化问题中具备简单、通用的优势,且已经在稀疏阵列寻优问题中获得了应用,因此这里选择遗传算法进行寻优求解。

遗传算法模拟生物进化论的自然选择和生物进化过程的计算模型,该方法从代表问题解的一个种群开始,按照优胜劣汰、适者生存的原理,逐代演化出近似最优解。对于每一代种群,根据设置的适应度值挑选个体,并对优选个体进行遗传学上的基因组合、交叉和变异,产生出代表新解集的种群。经过有限代选择,末代种群中的最优个体即作为问题的近似最优解。

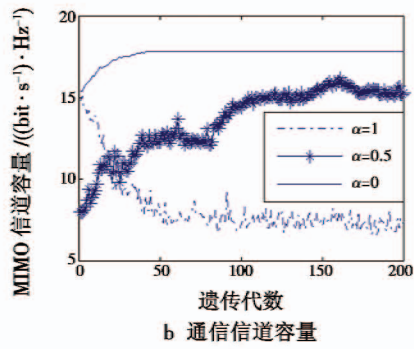
3 仿真实验与分析

为了验证本文提出的方法,设计了以下仿真实验,对阵元间距为半波长 $\lambda/2$ 的 M 个单元组成的线型阵列天线进行雷达、通信阵元优化分配,其中两端阵元应固定为雷达使用。按照遗传算法优化的参数规则,初始种群的个体数目 N_g 为50,待优化的阵元数 M 为64,相对于阵列的通信发射方阵元数 N_t 也为64(不相关),通信阵元相关系数 μ 为0.5,通信信道信噪比 ρ 为20 dB。其他参数则按经验设置为:最大遗传的代数 N_b 为200,基因交换控制参数 p_c 为0.7,基因变异的概率 p_m 为0.01。

图2a、图2b分别给出了当 α 选择不同值时,随着种群迭代数的增加,雷达最大相对旁瓣电平 $\max R_{SLL}$ 和代表通信信道容量 C_s 的变化曲线。显然,当 $\alpha = 0$ 时,约束条件中只有通信信道容量起作用;当 $\alpha = 1$ 时,约束条件是最大相对旁瓣电平起作用。



a 雷达最大相对旁瓣电平



b 通信信道容量

图2 α 取值不同时目标函数优化收敛曲线

Fig.2 Optimization convergence curves with different values of α
 从图2b中可以看出,当 $\alpha = 0$ 时,通信信道容量 C_s 达到最优值,此时等价于对天线阵列进行了通信优化。而从图2a中更可以看出,随着遗传代数的增长,只有当 $\alpha = 1$ 时, $\max R_{SLL}$ 才是下降的;其他两种情况下, $\max R_{SLL}$ 甚至是越来越差的。并且在这两个图中,随着迭代的增加,单独代表雷达和通信的性能还出现了波动。最后,当 $\alpha = 0.5$ 时,实际上得到了一个雷达和通信性能折中的优化结果。

图3则给出了当 $\alpha = 0.5$ 和 $\alpha = 1$ 时的最优雷达天线辐射方向图($\alpha = 0$ 时雷达阵元数太少,没有实际的物理意义),当然还可以据此再进行激励电平等的进一步优化。

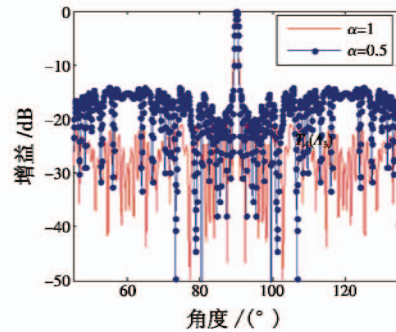


图3 当 $\alpha = 0.5$ 和 $\alpha = 1$ 时的天线辐射方向图
 Fig.3 Antenna radiation pattern when $\alpha = 0.5$ & $\alpha = 1$

图4进一步给出了当 $\alpha \in [0, 1]$ 时,分别经过遗传算法优化后,表示雷达的 $\max R_{SLL}$ 以及通信信道容量 C_s 的性能曲线。

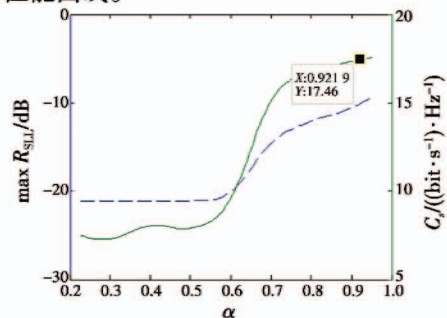


图4 α 在 $[0, 1]$ 中取值时的性能曲线
 Fig.4 Performance curve when $\alpha \in [0, 1]$

从图4可知,随着 α 的增大,在完成优化后,雷达阵列的 $\max R_{\text{SLL}}$ 是不断变大的(变差),相反,通信阵元形成的信道容量 C_s 是逐渐增大的(变优)。显然,在阵列天线有限的阵元数条件下,不存在一个满足 $\max R_{\text{SLL}}$ 和 C_s 同时达到最优的解,而需要根据具体的性能要求适当选取 α 。

4 结论

本文在稀疏阵列天线和交错子阵理论的基础上提出了雷达-通信天线共享孔径的新方法。分析了雷达阵列和通信系统的指标参数,分别选取了两个优化目标,提出了给定阵元数及孔径大小条件下的阵元位置优化问题,提出了基于遗传算法的求解方法并进行了仿真分析。在下一步的工作中,需要就子阵间干扰、平面阵列共享等问题进行深入分析。

参考文献

- [1] 张明友. 雷达-电子战-通信一体化概论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
- [2] TAVIK G C, HILTERBRICK C L, EVINS J B, et al. The advanced multifunction RF concept[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2005, 53(3): 1009-1020.
- [3] HUGHES P K, CHOE J Y. Overview of advanced multifunction RF system[C]//IEEE International Conference on Phased Array Systems and Technology, 2000: 21-24.
- [4] 于永, 雷志勇. 基于 STAP 杂波抑制的子阵优化技术[J]. 现代雷达, 2016, 38(9): 28-31.
- [5] 何向翎, 杨鹏, 闫飞, 等. 基于离网格结合粒子群算法的稀疏阵列综合[J]. 电波科学学报, 2016, 31(3): 473-478.
- [6] 滕志军, 郑权龙, 李可. MIMO 系统中基站天线递增选择算法[J]. 北京理工大学学报, 2014, 34(5): 495-500.
- [7] 李根, 马彦恒, 董健. 宽带阵列雷达发射波束形成方法[J]. 电光与控制, 2016, 23(6): 100-104.
- [8] 胡继宽, 王布宏, 李龙军. 共享孔径交错阵列综合优化方法[J]. 电光与控制, 2013, 20(8): 33-36.
- [9] TELATAR E. Capacity of multi-antenna Gaussian channels[J]. European Transactions on Telecommunications, 1999, 10(6): 585-595.
- [10] KHRUTMUANG D, SANTIPACH W. Antenna subset selection for MIMO channels with mutual coupling[C]//International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications & Information Technology, 2012: 1-4.
- [11] AALO V A. Performance of maximal-ratio diversity systems in a correlated Nakagami fading environment[J]. IEEE Transactions on Communication, 1995, 43(8): 2360-2369.
- [12] FONSECA C M, FLEMING P. Multi-objective optimization and multiple constraint handling with evolutionary algorithms-Part II: application example[J]. IEEE Xplore, 1998, 28(3): 38-47.

(上接第82页)

的时效性提出了更高的要求,对于装备而言,有效区分平时测试指标与应急战备指标,可以统筹实现平时对装备质量的全面掌握和战时的简洁高效、提纲挈领。而指标优化是首要的一环,后续研究中,还应进一步考虑测试数据中的噪声影响和时间序列等因素,从而更好地实现数据信息的充分挖掘,为战局主动赢得宝贵时间,为战备任务的有效遂行赢得先机。

参考文献

- [1] 丛林虎. 状态评估与预测[D]. 烟台: 海军航空工程学院, 2015.
- [2] 赵汝岩, 黄志勇, 吴昊. 某型固体发动机健康状态评估技术研究[J]. 固体火箭技术, 2013, 36(2): 270-273.
- [3] 郝晓军, 闫京海, 樊友谊. 大数据分析过程中的降维方法[J]. 航天电子对抗, 2014, 30(4): 58-60.
- [4] 侯晓东, 杨江平, 戴锦虹, 等. 雷达装备质量评估指标优化研究[J]. 空军预警学院学报, 2014, 28(3): 189-191.
- [5] 陈勇, 徐廷学, 闫群章. 基于熵权“区别度”的导弹电子系统质量评估指标体系的优化[J]. 海军航空工程学院学报, 2015, 30(5): 484-488.
- [6] 邓群钊, 林永钦, 丁荣华. 评价指标体系菱形生成方法研究[J]. 科技通报, 2006, 22(5): 719-724.
- [7] 张煜东, 霍元铠, 吴乐南, 等. 降维技术与方法综述[J]. 兵器装备工程学报, 2010, 31(10): 1-7.
- [8] 柴敏, 杨悦, 徐小辉, 等. 面向故障诊断的航天器遥测数据降维分析技术[J]. 弹箭与制导学报, 2014, 34(1): 150-153.
- [9] 梁胜杰, 张志华, 崔立林, 等. 基于主成分分析与核独立成分分析的降维方法[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(9): 2144-2148.
- [10] 林海明, 杜子芳. 主成分分析综合评价应该注意的问题[J]. 统计研究, 2013, 30(8): 25-31.