

引用格式: 娄昊, 张群, 王恺, 等. 面向雷达和通信一体化应用的阵列天线设计[J]. 电光与控制, 2017, 24(9): 54-57. LOU H, ZHANG Q, WANG K, et al. Antenna array design for integrated radar and communication system[J]. Electronics Optics & Control, 2017, 24(9): 54-57.

## 面向雷达和通信一体化应用的阵列天线设计

娄昊<sup>a</sup>, 张群<sup>a</sup>, 王恺<sup>b</sup>, 何其芳<sup>a</sup>

(空军工程大学, a. 信息与导航学院, 西安 710077; b. 科研部, 西安 710051)

**摘要:** 当前的阵列天线共用设计集中于2个或多个雷达应用,而在稀疏阵列技术基础上,交错配置雷达阵元和通信阵元,就可以实现雷达和通信的一体化,显著提高天线的利用效率。首先在循环差集理论的基础上构建了雷达稀疏阵列,分析了稀疏阵列的雷达天线方向图,在未占用阵元中对通信阵元进行1次配置;其次根据信道秩损效应,对阵元进行2次配置,提高通信的信道增益;最后仿真分析了共用天线的雷达和通信的技术指标,证明所提方法的有效性。

**关键词:** 雷达通信一体化; 稀疏阵列; 共用天线; 循环差集

中图分类号: TN955 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2017.09.012

## Antenna Array Design for Integrated Radar and Communication System

LOU Hao<sup>a</sup>, ZHANG Qun<sup>a</sup>, WANG Kai<sup>b</sup>, HE Qi-fang<sup>a</sup>

(Air Force Engineering University, a. Institute of Information and Navigation, Xi'an 710077;

b. Scientific Research Department, Xi'an 710051, China)

**Abstract:** Array antenna sharing design can significantly improve the utilization efficiency of the antenna. The current array antenna design focuses on two or more radar array. In addition, if radar array and communication array elements are in interleaved arrangement based on sparse array technology, the integration of radar and communication will be implemented. Firstly, based on cyclic difference sets theory, sparse array radar is established, and the sparse array radar antenna pattern is analyzed. Meanwhile, the untaken array elements are remained for communication. Secondly, a further array arrangement is executed to improve communication channel gain based on the channel rank deficient effect. Finally, technical indicators of the radar and communications integration antenna are simulated and analyzed, which verifies the effectiveness of the proposed method.

**Key words:** integrated radar and communication system; sparse array; antenna sharing; cyclic difference set

### 0 引言

近年来,雷达、通信、电子战设备的集成研究逐渐转向深入<sup>[1]</sup>,其中,天线的共用设计是一项重要研究内容。一种典型的设计是对天线孔径按照功能需求进行区域分割,不同的区域固定分配给不同的任务。但是只将天线孔径进行整体划分,势必造成每个功能实际孔径的减小,影响了天线性能发挥<sup>[2]</sup>。

稀疏布阵技术的提出为共用天线孔径提出了新的解决方案。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,从而节省阵列资源,在雷达<sup>[3-4]</sup>和通信<sup>[5]</sup>中都已经应用。而如果能将节省下来的阵元应用于通信等其他目的,即对同一阵列天线进行合理划分和嵌套,同时实现两种以上波束形成,就能极大地提高天线阵列的利用率,典型的如文献[6]利用循环差集实现了多子阵的稀疏交错布阵。

雷达和通信设备对天线阵列有着不同的定位,也就决定了在天线共用设计时必须同时考虑二者的性能需要。本文从稀疏阵列天线出发,在循环差集方法的基础上,明确了阵列天线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

收稿日期:2016-09-09

修回日期:2017-07-07

基金项目:国家自然科学基金(61571457);全军军事类研究生资助课题(2013JY509)

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

件下的阵元设计方法。

## 1 天线阵列技术

### 1.1 稀疏布阵技术

所谓天线共用阵列技术,就是将不同功能或不同频段的多个天线布置到同一个天线孔径中。美国海军的 AMRFC 方案已经应用了天线共用技术,在该方案中,将单个相控阵天线划分为多个独立子孔径,每个子孔径能够在不同状态下单独工作<sup>[1]</sup>。AMRFC 方案采用的高频多功能发射阵列包括 1024 对有源辐射单元,分成 4 个象限,每个象限由 256 对天线阵元组成,每个象限又进一步分成 4 个子孔径,单个或者多个子孔径联合执行雷达、通信等电子任务,如图 1 所示。

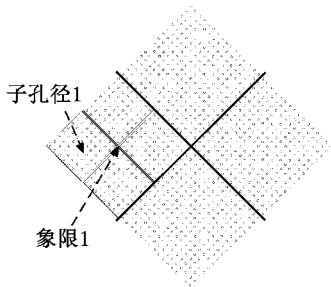


图 1 稀疏交错天线阵列示意图

Fig.1 Sketch map of sparse staggered array antenna

随着有源相控阵技术的进一步发展,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,此时阵元有雷达、通信和空置 3 种状态。

### 1.2 循环差集

循环差集  $D(V, K, \Lambda)$  是由 3 个整数  $V, K, \Lambda$  定义的集合,  $D = \{d_0, d_1, \dots, d_{K-1}\}$ , 其中,  $0 \leq d_i \leq (V-1)$  表示集合中的元素。集合要求,对于任意整数  $\alpha$ , 若  $1 \leq \alpha \leq (V-1)$ , 即有

$$(d_i - d_j) \pmod{V} = \alpha \quad i, j \in \{0, 1, \dots, K-1\}, i \neq j \quad (1)$$

恰好  $D$  中具有  $\Lambda$  个解集对  $\{d_i, d_j\}$ , 其中,  $\pmod$  表示取模操作。需要注意的是,  $D$  的补集  $D^* = [0, V-1] \setminus D$  同样也是循环差集, 且  $D^* = (V, V-K, V-2K+\Lambda)$ 。

从循环差集  $D(V, K, \Lambda)$  出发可以按照大小顺序构建一组由 0, 1 组成的序列  $A_D$ , 且

$$A_D(i_A) = \begin{cases} 1 & i_A \in D \\ 0 & i_A \notin D \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $i_A \in \{0, 1, \dots, V-1\}$ 。

而如果用循环差集  $D(V, K, \Lambda)$  来构造二维循环阵列时, 设阵列列数为  $V_x$ 、行数为  $V_y$ , 此时定义矩阵  $M_D$  为

$$M_D(m, n) = \begin{cases} 1 & i_M \in D \\ 0 & i_M \notin D \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $m = i_M \pmod{V_x}$ ,  $n = i_M \pmod{V_y}$ , 且  $i_M \in \{0, 1, \dots, V-1\}$ ;  $M_D(m, n) = 1$  的元素构造平面阵列中使能的阵元。

此外, 循环差集可通过平方剩余方法或完备距离循环排列方法来构造<sup>[7]</sup>, 在此不再展开。

### 1.3 基于循环差集的稀疏天线阵列

对于雷达阵列天线来说, 其天线方向图是需要考虑的首要因素。现对于  $V$  个阵元组成的阵列天线, 只利用  $K (K < V)$  个阵元发射雷达信号, 剩余  $V-K$  个阵元不发射电磁波, 这就是包含  $K$  个阵元的稀疏阵列。现假设相邻天线阵元间距为  $d$ , 其值与半波长  $\lambda/2$  相等; 天线辐射方向为阵列法向。

以线阵天线为例, 通常定义其方向图为

$$E(\theta) = \sum_{m=0}^{V-1} I_m \exp\left(j \frac{2\pi}{\lambda} m d \sin \theta\right) = \sum_{m=0}^{V-1} I_m \exp(j\pi m d \sin \theta) \quad (4)$$

式中:  $\theta$  表示阵列方位角角度;  $I_m$  表示第  $m$  个阵元的激励幅度。

天线标志位  $A_D = \{a_m\}$ ,  $m = 0, \dots, V-1$ , 表示每个阵元存在 2 种工作模式, 其定义参考循环差集公式。若  $a_m = 1$ , 表示该阵元工作在雷达状态;  $a_m = 0$ , 表示该阵元不工作, 则可将式(4)修改为

$$E(\theta) = \langle A_D, \mathbf{F}(\theta) \rangle = \sum_{m=0}^{V-1} I_m a_m \exp(j\pi m d \sin \theta) \quad (5)$$

式中:  $\mathbf{F}(\theta) = (I_0, I_1 \exp(jd \sin \theta), \dots, I_{V-1} \exp(j(V-1) \cdot d \sin \theta))^T$ ;  $\langle \cdot, \cdot \rangle$  表示计算内积。对于式(5)来说, 天线标志位  $A_D$  决定的单元工作模式是天线方向图的决定性因素。

采用循环差集方法构建的天线序列有很多优良性质, 如其经傅里叶变换后的主瓣峰值为  $K$ 、主瓣宽度与全阵列(即  $V$  个连续为 1 的阵元组成的阵列)接近, 旁瓣较低, 其中峰值旁瓣功率约为  $1/2K$ , 尤其适合稀疏天线阵列设计。

对于二维平面阵列, 其方向图函数通常包括方位角和俯仰向 2 个方向, 其方向图函数为

$$E(\theta, \varphi) = \langle M_D, \mathbf{F}(\theta, \varphi) \rangle = \sum_{n=0}^{V_x-1} \sum_{m=0}^{V_y-1} I_{m,n} M_D(m, n) \cdot \exp(j\pi m \sin \theta \cos \varphi + j\pi n \sin \theta \sin \varphi) \quad (6)$$

式中:  $\varphi$  表示阵列俯仰角, 其在一个方向的阵元数为  $V_x$ , 另一个方向阵元数为  $V_y$ ,  $m = 0, \dots, V_x-1$ , 且  $n = 0, \dots, V_y-1$ ;  $I_{m,n}$  表示第  $(m, n)$  个阵元的激励幅度;  $M_D$  表示平面阵列天线标志位, 见式(3);  $\mathbf{F}(\theta, \varphi) = [f_{m,n}(\theta, \varphi)]_{V_x \times V_y}$  表示二维矩阵, 矩阵元素  $f_{m,n}(\theta, \varphi) = I_{m,n} \exp(j\pi m \sin \theta \cos \varphi + j\pi n \sin \theta \sin \varphi)$ 。

最大旁瓣增益是评价天线阵列的常用指标。对于平面阵列来说, 最大相对旁瓣电平表示为

$$\max_{\theta, \varphi} RSL(E(\theta, \varphi)) = 20 \lg \left[ \max \left| \frac{\langle F(\theta, \varphi) \rangle}{FF_{\max}} \right| \right] \quad (7)$$

式中:  $(\theta, \varphi)$  的取值区间需要排除主瓣区域;  $FF_{\max}$  为主瓣峰值。

## 2 通信阵元选择

若将节省下来的阵元部分应用于通信,即可极大地提高天线阵列的利用效率,并且实现雷达和通信系统天线的一体化。然而,近年来的研究表明,由于某些传输信道特殊的散射结构或者天线的时空相干性,多天线通信会发生秩损现象,导致信道增益下降<sup>[8]</sup>。一种有效提高系统增益的方法是进行天线选择,即选择一部分通信阵元工作,另一部分不工作,将有限的功率集中到信道增益最高的阵元组合中,从而提高系统工作效率。也就是说,在不安排雷达工作的阵元中进行二次选择,最终选择最优的天线阵元组合。

多天线通信系统数据模型表示为

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{v} \quad (8)$$

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。设接收端已知信道矩阵  $\mathbf{H}$ , 信道容量可以表示为

$$C_i = \text{lbdet} \left( \mathbf{I} + \frac{\rho}{N_T} \mathbf{H}^H \mathbf{H} \right) \quad (9)$$

式中:  $(\cdot)^H$  表示矩阵复转置;  $\rho$  表示接收端的信噪比。

考虑阵列天线为收发共用天线,此处仅将阵列天线作为发射方使用,且与阵列天线对应的接收阵列不相关<sup>[9]</sup>,则信道  $\mathbf{H} = \mathbf{H}_o \mathbf{R}_i$ 。其中,  $\mathbf{H}_o$  表示 0 均值、方差为 1 的随机信道矩阵,  $\mathbf{R}_i$  表示发射阵列阵元间的空间相关矩阵。此时对  $\mathbf{R}_i$  进行特征值分解得到

$$\mathbf{R}_i = \mathbf{U}_i \mathbf{Q}_i \mathbf{U}_i^H \quad (10)$$

式中:  $\mathbf{U}_i$  为酉矩阵;  $\mathbf{Q}_i$  为对角阵,其对角元素为发射阵列相关矩阵特征值。则信道矩阵  $\mathbf{H} = \mathbf{H}_o \mathbf{R}_i^{1/2} = \mathbf{H}_o \mathbf{U}_i \cdot \mathbf{Q}_i \mathbf{U}_i^H$ , 容量式为

$$C_i = \text{lbdet} \left( \mathbf{I} + \frac{\rho}{N_T} (\mathbf{H}_o \mathbf{U}_i \mathbf{Q}_i \mathbf{U}_i^H)^H \mathbf{H}_o \mathbf{U}_i \mathbf{Q}_i \mathbf{U}_i^H \right) \quad (11)$$

当信噪比  $\rho$  较大时,且进行天线选择后

$$C_i = r \text{lbdet} \left( \frac{\rho}{n_i} \right) + \text{lbdet} (\mathbf{Q}_i^H \mathbf{Q}_i) + \text{lbdet} (\mathbf{H}_o^H \mathbf{H}_o) \quad (12)$$

式中:  $n_i$  为天线选择后的天线阵元数 ( $n_i \leq N_T$ );  $r$  表示  $\mathbf{H}$  的秩;  $\mathbf{Q}_i'$  表示天线选择后的阵元相关矩阵。此时在进行发射阵元选择时,式(12)的第 1 项随着  $n_i$  的减小而增大,而后 2 项是减小的,且  $\mathbf{Q}_i'$  由  $\mathbf{R}_i$  决定。

而文献[10]的研究表明,天线的相关性与天线阵元间距有关,可采用指数相关模型近似,即

$$R_i(i, j) = \sqrt{\mu_x^{2|i-j|} + \mu_y^{2|i-j|}} \quad (13)$$

式中:  $i, j$  表示阵元序号;  $\mu_x, \mu_y$  分别表示水平方向和垂直方向的相关系数,且  $|\mu_x| \leq 1, |\mu_y| \leq 1$ 。因此,在有限的功率限制下,合理选择通信阵元可以提高信道容量,在此处采用局部搜索方法实现<sup>[11]</sup>。

## 3 仿真实验与分析

为了验证本文提出的方法,设计以下仿真实验。首先以差集(63, 32, 16)构造二维平面稀疏阵列,如图 2 所示,此时  $x$  轴向阵元数量  $V_x = 9, y$  轴向阵元数量  $V_y = 7$ , 阵元最小间距  $\lambda/2$ , 其中,灰色阵元为未选中阵元。

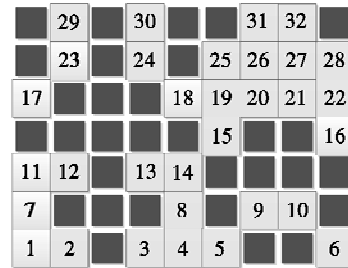


图2 平面稀疏天线阵列雷达配置图

Fig. 2 Radar elements arrangement of sparse planar array

图 3 所示为图 2 所示差集平面阵列的三维天线方向图。其中,阵列中央存在一个明显的主瓣,在其俯仰向和方位向上都存在起伏的旁瓣。

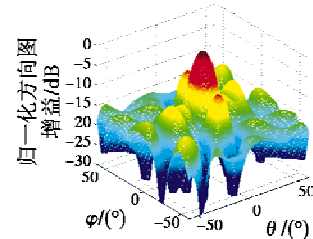
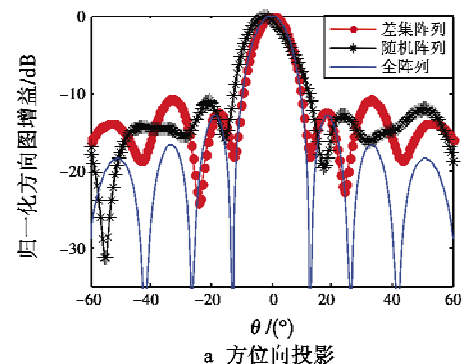


图3 平面阵列天线循环差集阵元方向图

Fig. 3 Planar array antenna pattern configured by cyclic difference sets

由图 3 可进一步得到天线方向图分别在方位向和俯仰向的投影,如图 4 所示。



a 方位向投影

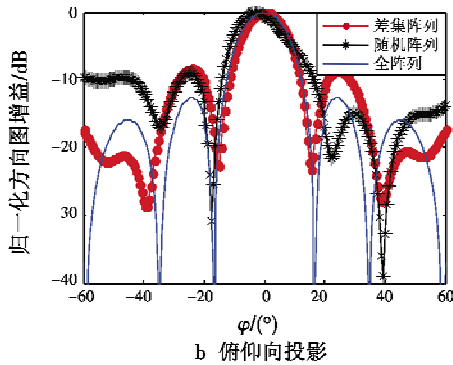


图4 平面阵列天线方向图投影

Fig.4 Planar array antenna pattern projection

图4中将差集构造的稀疏阵列与全阵元阵列、随机产生的32元稀疏阵列进行比较。显然,差集阵列的主瓣宽度、旁瓣电平比随机位置阵列具有明显优势,且更加接近全阵元阵列。

在进行通信阵列仿真时,假设接收阵列阵元数为  $N_R = 32$ ,信噪比  $\rho = 20$  dB,水平方向和垂直方向相关系数相等,为  $\mu_x = \mu_y = 0.5$ 。进行100次 Monte-Carlo 仿真实验,随机信道的信道容量平均值随发射阵元数的变化如图5所示。

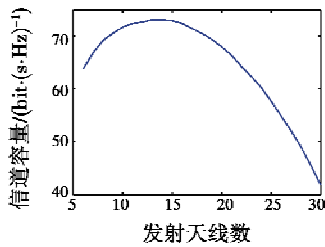


图5 信道容量随发射天线数变化曲线

Fig.5 Channel capacity vs number of transmit antennas

计算图5中信道容量的峰值可得,通信发射天线的最优数为14。经过对相关矩阵  $R_t$  的搜索后,得到雷达、通信阵元的位置分布如图6所示。其中,白色部分为雷达阵元,橙色部分为通信阵元,灰色部分为未选中阵元。

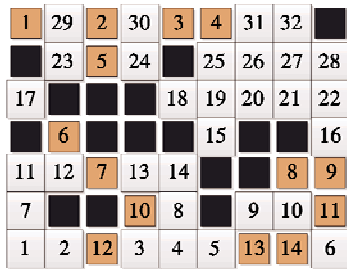


图6 雷达、通信共用孔径阵元配置图

Fig.6 Array elements arrangement of radar-communication sharing aperture

### 4 结束语

面对电子设备任务多样化和提高功率利用效率的综合要求,近年来阵列天线共用技术得到了广泛关注,本文在稀疏阵列技术和循环差集理论的基础上提出了雷达-通信共用天线孔径的新方法。本文将雷达和通信阵元交错配置在同一个阵列,分析了雷达阵列和通信系统的指标参数,计算出了共用孔径的阵元配置图。在下一步的工作中,需要就提高阵元利用效率、子阵间干扰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] 熊子源, 徐振海, 肖顺平. 聚类子阵划分及子阵级单脉冲测角性能分析[J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(9): 1867-1872.
- [3] 王晨光, 王布宏, 柏鹏. 秩损 MIMO 信道的收发天线联合选择方法[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2012, 13(1): 58-62.
- [4] 胡继宽, 王布宏, 李龙军. 共享孔径交错阵列综合优化方法[J]. 光电与控制, 2013, 20(8): 33-36.
- [5] 傅海阳, 陈技江, 曹士珂, 等. MIMO 系统和无线信道容量研究[J]. 电子学报, 2011, 39(10): 2221-2229.
- [6] SIMEONI M, LAGER I E, COMAN I, et al. Implementation of polarization agility in planar phased-array antennas by means of interleaved subarray[J]. Radio Science, 2009, 44(5): 1-12.
- [7] 靳蕃, 陈志. 组合编码原理及应用[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1995.
- [8] TELATAR E. Capacity of multi-antenna Gaussian channels [J]. European Transaction on Telecommunications, 1999, 10(6): 585-595.
- [9] KHRUTMUANG D, SANTIPACH W. Antenna subset selection for mimo channels with mutual coupling [C]//The 9th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, 2012: 1-4.
- [10] AALO V A. Performance of maximal-ratio diversity systems in a correlated Nakagami fading environment [J]. IEEE Transactions on Communications, 1995, 43(8): 2360-2369.
- [11] GHARAVI A M, GERSHMAN B. Fast antenna subset selection in MIMO systems [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2004, 52(2): 339-347.