

引用格式:唐波,汤俊,胡元奎.基于MIMO阵列的综合射频系统技术研究[J].信息对抗技术,2022,1(1):62-72. [TANG Bo, TANG Jun, HU Yuankui. Multifunction radio frequency systems based on MIMO array[J]. Information Countermeasure Technology, 2022, 1(1): 62-72. (in Chinese)]

## 基于MIMO阵列的综合射频系统技术研究

唐波<sup>1\*</sup>, 汤俊<sup>2</sup>, 胡元奎<sup>3</sup>

(1. 国防科技大学电子对抗学院, 安徽合肥 230037; 2. 清华大学电子工程系, 北京 100084;  
3. 中国电子科技集团公司第三十八研究所, 安徽合肥 230088)

**摘要** 综合射频系统集成雷达探测、数据通信和电子干扰等多种功能为一体, 显著提升武器平台在复杂战场环境下的生存能力和作战效能, 是武器装备的重点发展方向。针对现有综合射频技术难以高效同时实现多功能等不足, 提出构建基于多输入多输出(multi-input-multi-output, MIMO)阵列的综合射频系统。研究表明, 通过充分利用MIMO阵列的空间自由度和波形自由度, 基于MIMO阵列的综合射频系统能够同时实现多功能。将系统探测通信性能、反侦察抗干扰能力、兼容性等方面与传统综合射频技术进行对比, 表明基于MIMO阵列的综合射频系统具有独特优势。对基于MIMO阵列的综合射频系统关键技术进行了梳理分析和展望。

**关键词** 综合射频系统; 多输入多输出阵列; 波形优化

**中图分类号** TN 959.1 **文献标志码** A **文章编号** 2097-163X(2022)01-0062-11

**DOI** 10.12399/j.issn.2097-163x.2022.01.006

## Multifunction radio frequency systems based on MIMO array

TANG Bo<sup>1\*</sup>, TANG Jun<sup>2</sup>, HU Yuankui<sup>3</sup>

(1. College of Electronic Engineering, National University of Defense Technology, Hefei 230037, China;  
2. Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;  
3. No. 38 Research Institute of CETC, Hefei 230088, China)

**Abstract** Multifunction radio frequency (MFRF) systems support multiple functions including radar detection, data communications and jamming. Thus, MFRF systems can obviously enhance the survivability and the effectiveness of weapon systems in complex battlefield environments, and represent an important development tendency of military equipment. This study proposed an MFRF system based on MIMO array (MIMO-MFRF), which could overcome the limitations of existing systems such as the low efficiency of supporting multiple functions etc. Analysis showed that by exploiting the spatial and waveform diversity of

收稿日期: 2022-03-13 修回日期: 2022-03-24

通信作者: 唐波, E-mail: tangbo17@nudt.edu.cn

**作者简介:** 唐波(1985—), 男, 博士, 副教授, 入选中国科协青年人才托举工程, 获安徽省杰出青年科学基金资助, 省部级和国防科技大学高层次人才创新工程培养对象, 研究方向为雷达与雷达对抗技术; 汤俊(1973—), 男, 博士, 教授, 博士研究生导师, 中国工程院信息与电子工程科技发展研究中心专家委员会成员, 工业和信息化部“软件定义推进委员会”委员, 研究方向为雷达信号处理; 胡元奎(1979—), 男, 博士, 研究员, 研究方向为雷达对抗、综合射频系统技术

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(62171450, 61671453); 国家重点研发计划资助项目(2021YFA1402102); 安徽省杰出青年科学基金资助项目(2108085J30)

MIMO systems, MIMO-MFRF systems provided multiple functions simultaneously. Then all of the detection and communication performance, the capability of anti-reconnaissance and suppressing interference, and the compatibility of the MIMO-MFRF were compared with those of the conventional MFRF system, which demonstrated special superiority of the MIMO-MFRF system. Finally, the key techniques of MIMO-MFRF systems were analyzed. This study should be a reference for developing next-generation MFRF systems.

**Keywords** multifunction radio frequency (MFRF) systems; MIMO arrays; waveform optimization

## 0 引言

信息技术的快速发展使得现代战争的形态发生了深刻变化,基于信息系统的新型作战体系建设是打赢未来高技术局部战争的关键所在。为了适应信息化军事斗争中遂行多任务的需求,武器平台往往需要同时配备雷达探测、通信导航、敌我识别和电子对抗等多种作战手段。为此,长期以来,舰载、机载等武器平台上装备了功能单一、种类繁多的各类射频传感器。这在提升武器平台作战能力的同时,往往也导致了其他的问题:一是增加了系统的体积和重量,限制了作战平台的机动性能;二是大量的发射接收天线增加了平台散射截面积,降低了作战平台在战场环境中的生存能力;三是各类射频传感器之间的电磁兼容问题突出,制约了作战平台效能的有效发挥。

为了提高武器平台的效能、积极适应作战需求的变化,以美国为首的西方国家率先提出了综合射频系统的概念<sup>[1-2]</sup>。综合射频系统共用宽带天线孔径,对射频传感器进行一体化集成设计,基于开放式的信号处理软件架构和灵活的资源调度来实现雷达探测、通信导航、敌我识别和电子对抗等多种功能。相比于传统系统,综合射频系统大幅缩减了所需天线数量,显著降低了系统体积、重量、功耗和成本,有效减少了平台散射截面积,进一步提升了武器平台的机动作战能力和在战场环境中的生存概率,已经成为新一代武器装备平台的重要发展方向,引起了世界各国的极大关注。

## 1 现有综合射频系统技术分析

经过多年的发展,综合射频系统在天线孔径、接收通道、信号处理机、显控终端等方面已经实现了高度集成。现有的综合射频技术体制大

致可以分为 3 类:基于时分体制的综合射频技术、基于空分体制的综合射频技术和基于波形复用的综合射频技术。基于时分体制的综合射频系统通过时隙划分来实现多功能,工程实现简单,但存在无法同时实现多功能、任务资源调度困难等问题,难以充分发挥武器平台的作战效能,目前不是综合射频技术的发展重点。本文主要分析基于空分体制的综合射频技术和基于波形复用的综合射频技术的特点及不足。

### 1.1 基于空分体制的综合射频系统技术

美国是世界上最早研究综合射频技术的国家。从 20 世纪 90 年代起,在美国海军、空军和 DARPA 的资助下,先后开展了先进共用孔径项目(advanced shared aperture program, ASAP)<sup>[3]</sup>、先进多功能射频概念(advanced multifunction radio frequency concept, AMRFC)<sup>[1,4]</sup>、集成桅杆(InTop)计划<sup>[5]</sup>、宝石柱计划<sup>[6]</sup>等项目的研究。在这些项目的研究过程中,美军突破了超宽带阵列天线技术、可重构宽角扫描技术、一体化信号和数据处理等关键技术,相关研究成果已经在 F-35 战斗机、朱姆沃尔特级新型驱逐舰、圣安东尼奥级两栖船坞登陆舰等作战平台成功运用。近年来,多个西方发达国家也开展了综合射频技术的研究。例如,英国的皇家方舟号航空母舰中运用了先进技术桅杆(advanced technology mast, ATM)综合传感器技术,瑞典萨博防务和意大利 SELEX 公司联合研制了 M-AESA 多功能综合射频系统,法国泰勒斯公司开展了基于战斗机和无人战斗机的综合射频系统先导研究<sup>[6-9]</sup>。总体来看,这些综合射频系统大都采用了空分体制实现多功能。然而,基于空分体制的综合射频系统无法高效地利用天线孔径,存在天线增益不高、空间分辨能力不强、作用距离不远、数据传输速度不快等问题,且需消耗较多的频谱资源。

## 1.2 基于波形复用的综合射频系统技术

基于波形复用的综合射频系统使用共用天线孔径发射经过调制的电磁波信号实现雷达、通信和干扰等功能,避免了天线阵面切割导致的增益下降、空间分辨能力变差、作用距离变短等问题,是当前综合射频技术中的研究热点。一体化信号设计是基于波形复用的综合射频系统中的关键技术。现有的一体化波形致力于同时实现2种功能,代表性的一体化波形包括雷达通信一体化波形<sup>[10-15]</sup>和雷达干扰一体化波形等,其中雷达通信一体化波形主要包括基于雷达波形脉间调制的一体化波形、雷达-通信混合调制一体化波形和基于通信信号的一体化波形等。

利用雷达波形的脉间调制实现雷达通信一体化很早就有研究。美国马丁公司(洛克希德-马丁公司的前身)Randall Mealey在20世纪60年代提出了一种雷达通信一体化波形设计方案,该方案每次发射3个脉冲,通过变动第3个脉冲的位置实现二进制编码<sup>[16]</sup>。该方案实现简单,每发射一组脉冲可传输1个比特信息。随后,Fiden提出了采用变化的雷达脉冲重复频率来进行通信<sup>[17]</sup>。也有学者提出交替采用正负线性调频信号作为雷达发射信号,以调频斜率的正负极性代表所传递的通信信息。由此可以看出,利用雷达波形的脉间调制容易实现雷达通信一体化,但传输的数据率较低,因此只能应用于雷达导弹制导等对数据传输率要求不高的场合。

雷达-通信混合调制一体化波形是指经过脉内有意调制、可同时实现雷达探测和数据传输的波形。雷达-通信混合调制一体化波形一般具有2个特点:一是波形需满足雷达探测需求,例如波形具有较高的距离分辨力和较低的自相关旁瓣;二是一体化波形需要携带通信信息。在通信系统中,调幅、调频等模拟调制方式和相移键控、最小频移键控等数字调制方式是比较常见的调制方式;而雷达系统大都采用线性调频和相位编码等脉内调制方式。为此,Barrenechea提出一种被称为幅度调制-调频连续波信号(amplitude modulation-frequency modulated continuous wave, AM-FMCW)的一体化波形<sup>[18]</sup>。基于AM-FMCW的波形具有与调频连续波(frequency modulated continuous wave, FMCW)信号类似的特性,对回波进行解线调处理可以测定目标距离和速度,通

信接收方可以利用包络检波提取调制信息。AM-FMCW波形的缺点在于包络起伏较大,占空比较高,难以生成大功率雷达信号,限制了雷达系统作用距离。王小谟院士和陈兴波博士等<sup>[19]</sup>将通信中的MSK调制和雷达中的线性调频信号(linear frequency modulation, LFM)结合起来,提出了LFM-MSK一体化信号。LFM-MSK信号包络恒定、相位连续,具有与未调制的LFM信号相同的带宽,且多普勒容忍性较好。类似的工作还包括廖桂生教授课题组提出的Step-MFSK波形、张林让教授课题组提出的CE-OFDM波形、Nowak提出的BRPSK-LFM波形、Blunt教授提出的多相编码调频(polyphase-coded frequency-modulated, PCFM)波形等<sup>[20-24]</sup>。由于这类一体化波形调制了随机的通信信息,因此其自相关旁瓣通常较高,会给雷达系统检测微弱目标带来一定问题;其次,变化的通信信息使得信号的自相关函数在脉间存在起伏,不利于进行相参处理;第三,这类信号带外衰减速度慢,容易造成对邻近用频系统的干扰;最后,通信接收方需要更换已有的解调设备来对通信信息解调。为了避免上述一体化波形自相关旁瓣较高的问题,Brown教授提出以负线性调频信号作为雷达信号,以经过调制的DQPSK-正线性调频信号作为通信信号,将两者混合后作为一体化信号<sup>[25]</sup>。然而,这种经过混合后的信号不再具备恒包络,也浪费了相当多的发射能量。此外,正负线性调频信号之间的非理想正交特性也会对雷达探测和通信信息传输造成一定干扰。

基于通信信号的一体化波形以通信信号为载体,实现雷达探测功能。具有代表性的工作包括使用正交频分复用(orthogonal frequency division multiplex, OFDM)信号和扩频通信信号作为一体化波形。OFDM信号带宽大,频谱效率高,抗频率选择性衰落能力强,是宽带移动通信中的关键技术。Garmatyuk教授搭建了一套基于OFDM信号的雷达通信一体化实验系统<sup>[26]</sup>。初步试验结果表明该系统可达到0.3 m的距离分辨力和57 Mbit/s的传输速度。Wiesbeck教授系统地比较了基于扩频信号和基于OFDM信号的雷达通信一体化系统性能,认为采用OFDM信号作为一体化波形可以获得更好的雷达探测性能,采用扩频信号作为一体化波形则可以获得更

好的抗多用户干扰和通信性能<sup>[27]</sup>。廖桂生教授课题组针对 Wiesbeck 所提算法距离多普勒分辨率不高的问题,提出了一种基于脉冲 OFDM 信号的高分辨雷达通信一体化系统<sup>[28]</sup>。Ellinger 博士提出了一种基于多载频相位编码信号(multicarrier phased codes, MCPC)和 P3/P4 相位编码信号的一体化波形,在此基础上提出了目标检测和通信的有效处理算法<sup>[29]</sup>。Li 教授课题组研究了基于 OFDM 的雷达通信一体化系统,通过对 OFDM 子载波的功率优化,提高了雷达探测性能和通信数据率<sup>[30]</sup>。梁兴东教授课题组基于 OFDM 信号同时进行了机载 SAR 成像和无线通信<sup>[31]</sup>。基于通信信号的一体化波形主要存在以下问题:一是通信信号带宽不大,难以满足雷达探测的距离分辨力需求;二是若采用连续发射的通信信号,发射功率难以满足雷达探测的作用距离需求;三是 OFDM 等通信信号非恒定包络,使用雷达中常用的饱和发射机会使得信号失真。

由于噪声信号的模糊函数具有比较理想的图钉状特征,适合作为雷达发射信号,因此国内外学者研究了如何利用噪声信号实现探测干扰一体化。20 世纪 50 年代, Horton 提出了基于随机噪声信号测量目标距离<sup>[32]</sup>。20 世纪 90 年代以来, Narayanan 教授对噪声雷达开展了大量的研究,证实了超宽带噪声雷达估计多普勒频率和对静止目标成像的能力<sup>[33]</sup>。Axelsson 博士对噪声雷达信号的自相关函数和模糊函数进行了大量的理论分析,并进行了试验验证<sup>[34]</sup>。国内研究方面,刘国岁教授、顾红教授和苏卫民教授等对于

使用噪声信号作为雷达发射波形开展了系统的研究<sup>[35]</sup>,并研制了噪声雷达试验系统。采用噪声信号作为雷达发射信号的主要问题是存在收发泄露,难以探测远距离目标。

综上所述,现有的一体化波形研究工作仍然存在以下不足:一是现有的一体化波形难以实现 2 种以上功能;二是一些一体化波形自身存在局限性(例如通信的数据率较低、波形非恒包络、波形峰值功率受限、波形的模糊函数特性不理想、波形存在能量泄露等),难以满足雷达、通信等系统的实际需求,制约了武器平台的效能发挥;三是现有的一体化波形设计方案与已有系统的兼容性不好,需要构建专门的发射机和接收机才能实现 2 种功能,导致平台升级改造的成本很高。为解决现有综合射频系统难以高效同时实现多功能的问题,本文提出采用多输入多输出(multiple-input-multiple-output, MIMO)阵列来实现综合射频系统(在不引起歧义的情况下,简称为 MIMO 综合射频系统)。

## 2 MIMO 综合射频系统设计

MIMO 阵列是指在发射端采用多个通道发射独立的波形,在接收端采用多个通道同时接收信号的天线阵列,如图 1 所示<sup>[36]</sup>。发射多波形分集是 MIMO 阵列最突出的特点。通过多波形优化,基于 MIMO 阵列的射频系统不仅可以实现传统相控阵列系统所有的功能,而且在复杂环境中具有更强的目标探测和数据通信能力。

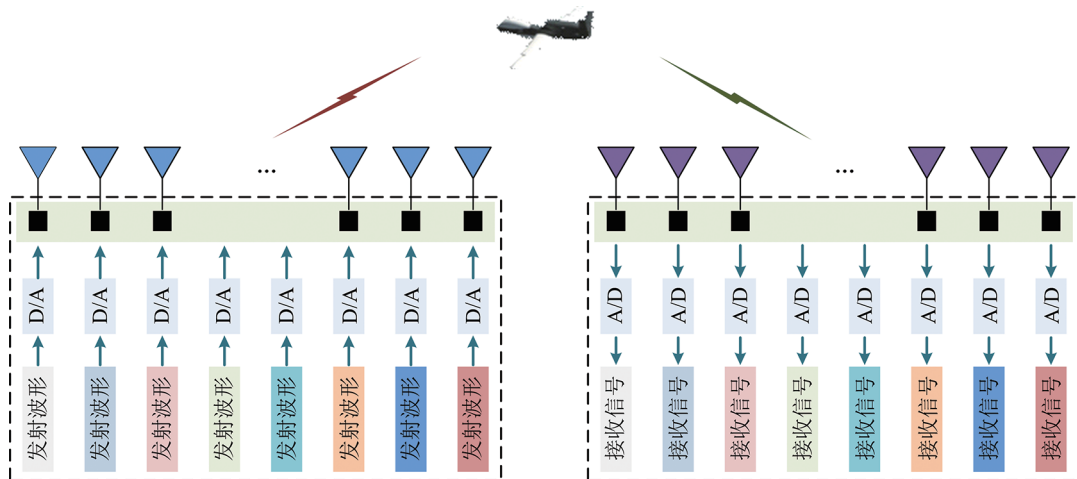


图 1 MIMO 阵列示意图

Fig. 1 Illustration of MIMO array

## 2.1 系统概念和基本原理

本文所构建的 MIMO 综合射频系统如图 2 所示,其中系统的发射阵元数(或者独立通道数)记为  $M$ ,阵列几何构型和阵元之间的间距可根据具体应用场景设定,即阵列可以配置为线性阵列、平面阵列、圆阵以及共形阵列等,阵元之间的间距既可以设定为半波长,也可以为其他间距(为减少阵元之间的互耦,阵元间距不得低于半波长)。系统最突出的特点是各个阵元可以发射不同的信号。将各个阵元的发射波形依次记为  $s_1(t), s_2(t), \dots, s_M(t)$ 。假设目标位于远场,根据阵列信号处理理论,在偏离阵列法线方向  $\theta$  处,系统所辐射的信号可以建模为:

$$y(t) = \mathbf{a}_T^T(\theta) \mathbf{s}(t) \quad (1)$$

式中,  $\mathbf{a}_T(\theta)$  为 MIMO 阵列在  $\theta$  处的发射导引矢量,  $\mathbf{s}(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_M(t)]^T$  为发射波形组成的矢量。

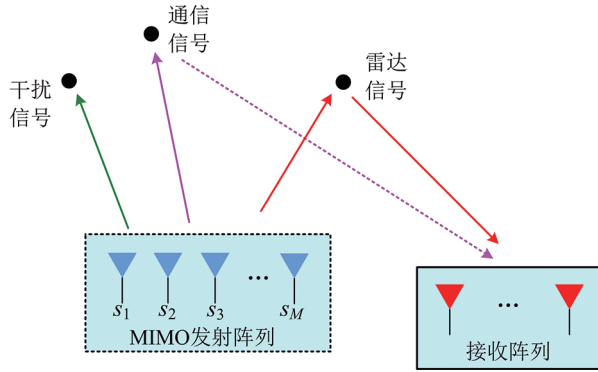


图 2 MIMO 综合射频系统示意图

Fig. 2 Illustration of MIMO MFRF systems

综合射频系统最重要的 3 种功能是雷达探测、数据通信和电子战,即实现探通扰一体化。雷达探测的过程包括发射电磁波信号,对目标回波进行处理,估计目标参数等。进行雷达探测时,要求雷达信号要具有良好的模糊函数特性。另外,为了便于实现相参积累,希望在一个相参处理间隔内发射相同的雷达信号。对于数据通信,从应用场合来讲包括视距通信(例如,飞机与舰船之间传递数据)、卫星通信(包括上行链路和下行链路)和数据链等,通信方式包括单向通信和双向通信等。进行数据通信时,希望能够达到尽可能高的数据率。电子战主要包括电子对抗侦察和电子干扰。电子对抗侦察(包括 ESM 和 ELINT)以无源的方式进行(即系统只接收信号,不发射信号),要求接收机在空间上和频率上宽

开。通过对截获信号的分析,为实施电子干扰提供支撑。下面简要说明 MIMO 综合射频系统如何通过发射波形优化,同时实现探通扰 3 种功能。

假设待检测目标、通信接收方和待干扰对象所在的出发角分别为  $\theta_r, \theta_c, \theta_j$ 。根据式(1),抵达目标、通信方和被干扰方的信号分别为:

$$\begin{cases} s_r(t) = \mathbf{a}_T^T(\theta_r) \mathbf{s}(t) \\ s_c(t) = \mathbf{a}_T^T(\theta_c) \mathbf{s}(t) \\ s_j(t) = \mathbf{a}_T^T(\theta_j) \mathbf{s}(t) \end{cases} \quad (2)$$

从式(2)可以看出,雷达信号  $s_r(t)$ 、通信信号  $s_c(t)$  和干扰信号  $s_j(t)$  是 MIMO 阵列各发射波形的线性组合,且线性组合系数不同。因此,如果  $s_1(t), s_2(t), \dots, s_M(t)$  之间不完全相关,雷达信号  $s_r(t)$ 、通信信号  $s_c(t)$  和干扰信号  $s_j(t)$  就不完全相同。换句话说,利用已知的天线阵列流形信息,结合发射波形优化,就能实现空间电磁波的调控。为了说明这一点,将期望的雷达信号、通信信号和干扰信号分别记为  $d_r(t), d_c(t)$  和  $d_j(t)$ 。所谓发射波形优化,就是指通过优化设计  $s(t)$ ,使得  $s_r(t)$  与  $d_r(t)$ 、 $s_c(t)$  与  $d_c(t)$ 、 $s_j(t)$  与  $d_j(t)$  之间的误差尽可能小,其等价于如下的优化问题求解:

$$\begin{cases} \min_{s(t)} E = (s_r(t) - d_r(t))^2 + (s_c(t) - d_c(t))^2 + \\ (s_j(t) - d_j(t))^2 \\ \text{s. t. } \int \mathbf{s}^H(t) \mathbf{s}(t) dt \leq e_0 \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $E$  为匹配误差,  $e_0$  为发射波形总能量。为便于设计发射信号,将所有信号进行模数转换成数字信号,则式(3)中的优化问题可以重写为:

$$\begin{cases} \min_S E = \|\mathbf{s}_r - \mathbf{d}_r\|_2^2 + \|\mathbf{s}_c - \mathbf{d}_c\|_2^2 + \\ \|\mathbf{s}_j - \mathbf{d}_j\|_2^2 \\ \text{s. t. } \text{tr}(\mathbf{S}\mathbf{S}^H) \leq e_0 \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $\mathbf{s}_r, \mathbf{s}_c$  和  $\mathbf{s}_j$  分别为对应于  $s_r(t), s_c(t)$  和  $s_j(t)$  的离散信号矢量,  $\mathbf{d}_r, \mathbf{d}_c$  和  $\mathbf{d}_j$  分别为对应于  $d_r(t), d_c(t)$  和  $d_j(t)$  的离散信号矢量,  $\mathbf{S}$  为综合射频系统的发射波形矩阵,其第  $m$  行对应于第  $m$  个发射通道的波形。注意到

$$\begin{cases} \mathbf{s}_r = \mathbf{a}_T^T(\theta_r) \mathbf{S} \\ \mathbf{s}_c = \mathbf{a}_T^T(\theta_c) \mathbf{S} \\ \mathbf{s}_j = \mathbf{a}_T^T(\theta_j) \mathbf{S} \end{cases} \quad (5)$$

故式(4)的优化问题又可重写为:

$$\begin{cases} \min_S E = \| \mathbf{S}^T \mathbf{A} - \mathbf{D} \|_F^2 \\ \text{s. t. } \text{tr}(\mathbf{S}\mathbf{S}^H) \leq e_0 \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $\mathbf{A} = [\mathbf{a}_T(\theta_r), \mathbf{a}_T(\theta_c), \mathbf{a}_T(\theta_j)]$ ,  $\mathbf{D} = [\mathbf{d}_r, \mathbf{d}_c, \mathbf{d}_j]$ 。很明显,当只考虑能量约束时,式(6)是一个凸优化问题,可以求得全局最优解。另外,不难得出,在系统发射能量足够高时,如果阵元数足够多(意味着阵元自由度大于综合射频系统要实现的功能数)且矩阵  $\mathbf{A}$  的条件数较好时(意味着目标、通信接收方、干扰对象在角度域上分隔较远),匹配误差可以取值为 0,其中发射能量最小的解为:

$$\mathbf{S}_{\min} = \mathbf{A}^* (\mathbf{A}^T \mathbf{A}^*)^{-1} \mathbf{D}^T \quad (7)$$

对应的最小发射能量为:

$$e_{\min} = \text{tr}(\mathbf{S}_{\min} \mathbf{S}_{\min}^H) \quad (8)$$

因此,当  $e_0 \geq e_{\min}$  时,最优解为  $\mathbf{S}_{\min}$ ,最优值为 0;

反之,如果  $e_0 < e_{\min}$ ,则最优解为:

$$\mathbf{S}^{\text{opt}} = \mathbf{A}^* (\mathbf{A}^T \mathbf{A}^* + \lambda \mathbf{I})^{-1} \mathbf{D}^T \quad (9)$$

式中, $\lambda$  为拉格朗日乘子,可通过约束  $\text{tr}(\mathbf{S}\mathbf{S}^H) = e_0$  求解。

为了说明通过优化发射波形可实现空间电磁波的调控,考虑具有 16 个阵元的 MIMO 阵列,阵列为线性均匀阵列,阵元间距为半波长。假设待探测目标、待通信目标和待干扰目标相对于天线阵列法线方向的偏角为  $0^\circ$ 、 $45^\circ$  和  $-45^\circ$ 。假设使用线性调频信号作为雷达发射信号,QPSK 信号作为通信信号,射频噪声干扰作为干扰信号。MIMO 综合射频系统在空间合成的雷达、通信和干扰信号如图 3 所示。可以看出,MIMO 综合射频系统可以在给定空间位置合成理想的雷达信号、通信信号和干扰信号,进而为系统同时实现多功能奠定了基础。

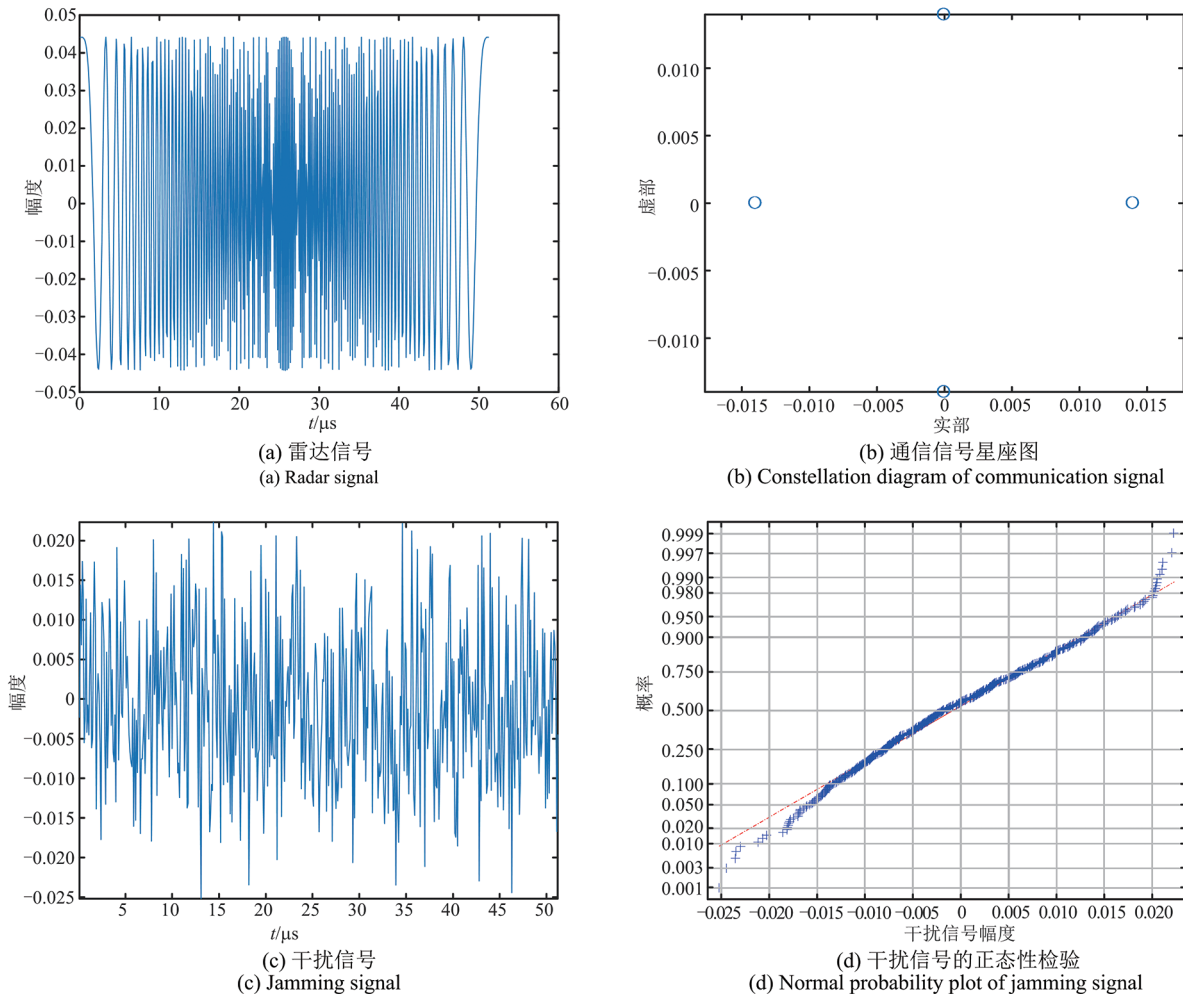


图 3 MIMO 综合射频系统在空间合成的多种波形

Fig. 3 The multiple waveforms synthesized by the MIMO MFRF system

## 2.2 系统特点

MIMO 综合射频系统具有如下特点和优势:

(1) 可涵盖多种技术体制。MIMO 综合射频系统与现有的综合射频技术完全兼容,时分、空分、波分等 3 种综合射频技术体制可以完全移植至 MIMO 综合射频系统中,系统仅需要相应地调整发射策略(例如,时隙的分割方法,阵面的切割方法和系统的发射波形)。

(2) 遂行同时多功能的能力更强。通过波形优化,MIMO 综合射频系统可以在无需划分天线阵面的条件下,在不同区域辐射不同的信号波形,即系统具备同时实现 2 种以上功能的能力。系统能够实现的功能数取决于系统的独立波形数、阵列孔径等。具体来说,如果系统的自由度越高,即系统阵元数/独立波形数越多,阵列孔径越大,目标、通信接收方、干扰对象在空间角度上越分散,系统实现同时多功能的能力越强。相比于基于空分体制的综合射频系统,MIMO 综合射频系统天线孔径利用率更高,更有利于充分发挥武器平台的作战效能。而相比于基于波形复用的综合射频系统,基于 MIMO 阵列和多波形优化的综合射频系统传输的通信速率更高、能实现恒包络发射,可以同时实现雷达探测、数据通信和电子干扰等更多的功能。

(3) 反侦察、抗干扰能力强。系统天线阵列的每个通道可以发射互不相同的信号。从以上分析可以看出,抵达空间任意位置的电磁波信号可以视为所有发射波形的线性组合,其中线性组合的系数取决于路径衰减、天线阵列流形和空间角度等。也就是说,MIMO 综合射频系统所辐射的信号是随空间位置变化的,使得对抗方侦察、截获、分析和识别难度很大。与此同时,MIMO 综合射频系统干扰抑制能力更强,因此在信息对抗中具有明显的优势。

(4) 系统兼容性好。抵达通信接收方的信号可以根据需要设定为常规通信信号,具体信号波形和调制方式可以随综合射频系统发射波形灵活调整,故与传统的通信接收机完全兼容,无需更改通信接收机解调设备。

(5) 通信速率高。通信的传输速率可以很高。根据香农定理,通信的信道容量取决于带宽和信噪比。在发射通信信号时,可以基于系统阵列合成获得很高的信噪比。因此只要发射信号

的带宽足够高,基于综合射频系统可以获得很高的传输速率。

(6) 雷达探测性能优越。在空间合成的雷达波形可以是现有的常见雷达信号(例如线性调频信号或典型相位编码信号),具有优越的模糊函数特性,接收端采用常规处理算法便可完成目标探测;另外,通信数据和干扰信号样式变化时,只要调整综合射频系统发射波形,可以使得综合出的雷达波形保持不变,因此不存在所谓的距离旁瓣调制问题,有利于雷达系统实现相参处理,提高了对目标的探测性能。

(7) 所需频谱资源少,有效避免频谱拥塞。MIMO 综合射频系统,通过利用 MIMO 阵列的空间自由度和发射自由度,基于阵列共享、波形共享和频谱共享,能够在复杂环境中同时实现雷达探测、数据通信和电子干扰等多种功能。相比于基于空分体制的综合射频系统,MIMO 综合射频系统所消耗的频谱资源明显变少,最大程度地避免了频谱拥塞的问题,提高了系统的电磁兼容性。

## 3 MIMO 综合射频系统关键技术

尽管 MIMO 综合射频系统在同时实现探测干扰多功能方面显示了巨大的潜力,但系统信号处理理论与方法还未形成完整的研究体系,部署实用的 MIMO 综合射频系统仍然还有很多亟待解决的理论与技术问题。接下来对 MIMO 综合射频系统的参数估计、一体化波形设计、阵列优化配置、系统软硬件架构设计以及核心基础器件等关键技术进行分析。

### 3.1 参数估计

从 MIMO 综合射频系统工作原理可以看出,系统实现同时多功能的前提是需要确定目标、合作通信方和被干扰方的所在位置,因此估计相应的位置参数是系统需要解决的关键问题。为确定目标、合作通信方和被干扰方的所在位置,首先需要建立 MIMO 综合射频系统模型。系统模型建立时需要考虑 2 种情况:一是综合射频系统在同时遂行雷达探测、数据通信和电子干扰等多任务时,只发射通信信号,未接收通信信号。这种情况下的信号模型称为下行信号模型;二是综合射频系统在同时遂行多任务时,接收并解译外部通信信号。这种情况下的信号模型称为上行信号模型。下面简要说明在下行信号模型

中,如何估计目标、合作通信方和被干扰方的参数。

MIMO 综合射频系统功能及工作环境如图 4 所示,在下行信号模型中,影响目标信号的主要是杂波、有源干扰和噪声,故而接收信号  $\mathbf{Y}$  可采用下面的方法建模:

$$\mathbf{Y} = \underbrace{\sum_n \alpha_{r,n} \mathbf{b}_R(\theta_{r,n}) \mathbf{a}_T^T(\theta_{r,n}) \mathbf{S}}_{\text{目标}} + \underbrace{\sum_k \alpha_{c,k} \mathbf{b}_R(\theta_{c,k}) \mathbf{a}_T^T(\theta_{c,k}) \mathbf{S}}_{\text{杂波}} + \underbrace{\mathbf{N}}_{\text{干扰}} \triangleq \mathbf{H}_r \mathbf{S} + \mathbf{H}_c \mathbf{S} + \mathbf{N} \quad (10)$$

式中,  $\mathbf{b}_R(\theta) \in \mathbb{C}^{N \times 1}$  为 MIMO 综合射频系统的接收阵列导引矢量,  $\mathbf{N} = \mathbf{N}_1 + \mathbf{N}_2$  为干扰 ( $\mathbf{N}_1$ ) 加噪声 ( $\mathbf{N}_2$ ) 信号,  $\alpha_{r,n}, \theta_{r,n}$  为第  $n$  个目标的幅度和角度,  $\alpha_{c,k}, \theta_{c,k}$  为第  $k$  个杂波块的幅度和角度。可以看出,目标和杂波信号取决于所在角度和系统发射波形。对于有源干扰,可采用统计方法对其建模。例如,对于窄带干扰信号,它在时域不相关,但到达 MIMO 阵列时具有很强的空间相关性,其统计特征主要取决于各干扰信号的到达角,可以建模为:

$$\mathbf{N}_1 = \sum_m \alpha_{j,m} \mathbf{b}_R(\theta_{j,m}) \mathbf{y}_{j,m}^T \quad (11)$$

式中,  $\alpha_{j,m}, \theta_{j,m}$  为第  $m$  个干扰的幅度和到达角,  $\mathbf{y}_{j,m}$  为第  $m$  个干扰所发射的干扰波形。因此矩阵  $\mathbf{N}_1$  的各列可建模为独立同分布的高斯随机变量,其协方差矩阵为:

$$\mathbf{Q} = \sum_m \sigma_{j,m} \mathbf{b}_R(\theta_{j,m}) \mathbf{b}_R^H(\theta_{j,m}) \quad (12)$$

式中,  $\sigma_{j,m} = E[\alpha_{j,m} \alpha_{j,m}^*]$ 。

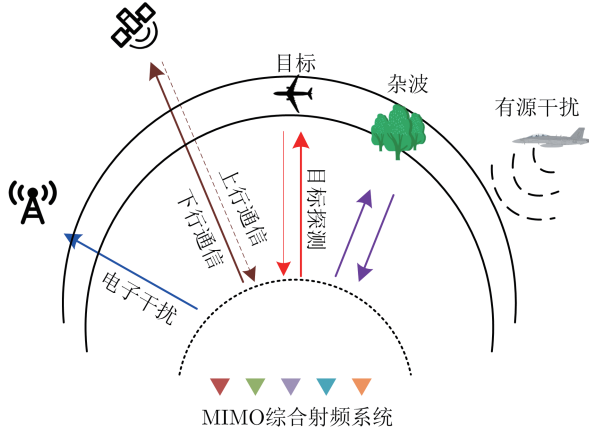


图 4 MIMO 综合射频系统功能及工作环境示意图

Fig. 4 Illustration of the functions and operating scenario of MIMO MFRF systems

接下来采用非参数化方法进行角度估计。首先设计接收滤波器的权值  $\mathbf{w}$ 。为了减少干扰信号对于角度估计结果的影响,通过接收滤波器后的干扰信号能量必须尽可能小。为此,考虑建立如下优化问题来设计滤波器权值  $\mathbf{w}$ :

$$\begin{cases} \min_{\mathbf{w}} \mathbf{w}^H \hat{\mathbf{R}} \mathbf{w} \\ \text{s. t. } \mathbf{w}^H \mathbf{b}_R(\theta) = 1 \end{cases} \quad (13)$$

式中,  $\hat{\mathbf{R}} = \frac{1}{L} \mathbf{Y} \mathbf{Y}^H$ 。

上述优化问题的解为:

$$\mathbf{w} = \frac{\hat{\mathbf{R}}^{-1} \mathbf{b}_R(\theta)}{\mathbf{b}_R^H(\theta) \hat{\mathbf{R}}^{-1} \mathbf{b}_R(\theta)} \quad (14)$$

故接收信号  $\mathbf{Y}$  经过滤波器  $\mathbf{w}$  后的输出为:

$$\mathbf{y}_w = \frac{\mathbf{b}_R^H(\theta) \hat{\mathbf{R}}^{-1} \mathbf{Y}}{\mathbf{b}_R^H(\theta) \hat{\mathbf{R}}^{-1} \mathbf{b}_R(\theta)} \quad (15)$$

注意到基于式(10)中的信号模型,  $\mathbf{Y}$  可以等效地写成:

$$\mathbf{Y} = \alpha \mathbf{b}_R(\theta) \mathbf{a}_T^T(\theta) \mathbf{S} + \mathbf{W} \quad (16)$$

即将接收信号  $\mathbf{Y}$  视为期望信号和干扰信号(记为  $\mathbf{W}$ )之和,则式(15)中的输出可以表示为:

$$\mathbf{y}_w = \alpha \mathbf{a}_T^T(\theta) \mathbf{S} + \mathbf{z}_w \quad (17)$$

式中,  $\mathbf{z}_w$  为各种干扰信号经过滤波器的输出。因此再将  $\mathbf{y}_w$  通过一个等效的“匹配滤波器”(记为  $\beta \mathbf{S}^H \mathbf{a}_T^*(\theta)$ ),其中:

$$\beta = \frac{1}{\mathbf{a}_T^T(\theta) \mathbf{S} \mathbf{S}^H \mathbf{a}_T^*(\theta)} \quad (18)$$

便可得到角度  $\theta$  处幅度  $\alpha$  的估计为:

$$\hat{\alpha} = \frac{\mathbf{b}_R^H(\theta) \hat{\mathbf{R}}^{-1} \mathbf{Y} \mathbf{S}^H \mathbf{a}_T^*(\theta)}{\mathbf{b}_R^H(\theta) \hat{\mathbf{R}}^{-1} \mathbf{b}_R(\theta) \cdot \mathbf{a}_T^T(\theta) \mathbf{S} \mathbf{S}^H \mathbf{a}_T^*(\theta)} \quad (19)$$

### 3.2 一体化波形设计

系统波形设计的目的是利用综合射频系统的共享天线孔径同时完成雷达探测、数据通信和电子对抗等多种功能,是 MIMO 综合射频系统最大的特色之一,也是实现同时多功能的关键所在。信号的优化设计可以划分为若干个阶段,每个阶段具有不同的特点。在常规工作阶段,综合射频系统根据参数估计阶段所获取的目标、合作通信方和被干扰方信息对发射信号优化设计,对给定距离和方位的电磁波信号进行精确调控,综合出雷达信号、通信信号和干扰信号。在实际应用中,为了避免发射信号通过饱和发射机引起失真,要求发射信号包络恒定或者峰值平均功率比较低。因此在信号设计时需要引入低峰均比或



者恒包络约束。在引入各类约束后,发射信号设计就等同于非凸非线性优化问题的求解。例如:假设 MIMO 综合射频系统的发射阵元数为 32,发射阵列为线性均匀阵列,阵元间距为半波长,雷达波形的码元个数为 128 位,为恒包络信号。系统感兴趣的空域从  $-90^\circ \sim 90^\circ$ ,按照  $1^\circ$ 的间隔划分成 181 个点。考虑到多目标跟踪的问题,希望 MIMO 综合射频系统在空间形成 3 个主瓣。另外,与综合射频系统通信的用户数为 2,期望的

通信波形为 QPSK 信号。不难得出,此时的一体化波形设计问题等同为恒包络约束下的四次优化问题。本文采用坐标下降法等优化算法对一体化波形进行设计,所合成的雷达方向图如图 5 所示<sup>[37]</sup>。可以看出发射方向图和期望方向图比较接近,在期望的角度方向能够形成比较平坦的响应。另外,从综合射频系统所合成的通信信号星座图来看,所合成的 QPSK 通信信号具有较为理想的星座图,即表明合成误差较小。

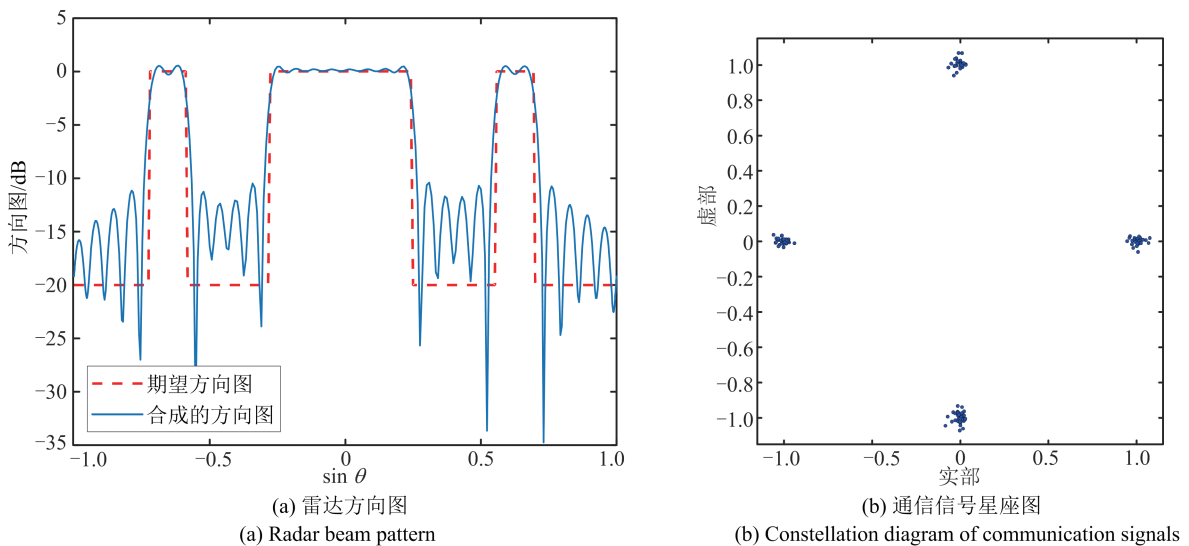


图 5 MIMO 综合射频系统在空间合成的雷达方向图和通信信号

Fig. 5 The radar beam pattern and communication signals synthesized by the MIMO MFRF system

### 3.3 阵列优化配置

大规模超宽带阵列天线优化设计是实现综合射频系统雷达探测、数据通信和电子对抗等功能的结构基础。现有均匀面阵的阵元间距小于或等于半波长,存在高互耦、高冗余度和硬件复杂等问题。相比均匀阵列,稀疏阵列在改善阵列性能和降低硬件成本方面具有巨大优势。因此,通过对最小冗余阵列、互质阵和嵌套阵列等典型稀疏阵列的优化配置,提高综合射频系统的自由度,降低系统天线阵列的通道互耦,是发展低成本、超轻型、高精度、高分辨的综合射频系统需要解决的关键技术,在实现机载/星载/舰载综合射频技术方面具有重要的应用前景。

### 3.4 系统软硬件架构

综合射频系统涉及到电磁空间中的海量数据进行分析、处理、存储和分发,因此必须建立在高性能计算技术和高速网络传输技术的基础上。综合射频系统通过软件定义来实现各种功能,软件系统不仅要支持系统现有信号和数据处理功

能,而且在新增任务或功能时,仅需更新软件组件,无需重新配置硬件资源。因此可重构软件也是系统的关键技术之一。

### 3.5 核心基础器件

综合射频系统可以根据需要选择工作在不同的频段。另外,当系统部署在机载/星载平台时,对天线的尺寸和重量也有严格的限制。为此,综合射频系统需要采用轻型超宽带天线阵列。同理,为了接收宽频段内的电磁波信号,宽带数字接收机是必不可少的。为了产生各类复杂波形,高速高精度 DAC 也是关键。综上,超宽带天线阵列、高速高精度 DAC 和宽带数字接收机的研制是综合射频系统所需的关键基础器件。

## 4 结束语

本文针对现有综合射频技术的不足,提出基于 MIMO 阵列构建 MIMO 综合射频系统。该系统不仅可以和现有的综合射频技术完全兼容,而且可以通过多波形优化设计,在无需划分天线阵

面的条件下,分区域辐射形式多样的信号波形,以较少的频谱资源同时实现多种不同的功能,另外还有望获得更好的雷达探测性能,更高、更安全的通信传输速率,以及更强的抗干扰和抗截获能力,具有广阔的军事应用前景。需要指出的是,虽然MIMO综合射频系统作为一种新兴的体制显示了巨大的潜力,但仍然存在大量亟待深入研究的问题。本文对MIMO综合射频系统的参数估计、一体化波形设计、阵列优化配置、系统软硬件架构、核心基础器件研制等关键技术进行了展望。相信随着以上关键技术的不断突破,可以将各类电子信息系统的一体化程度推向更高的水平。

### 参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 胡元奎,靳学明,范忠亮. 多功能综合射频系统技术研究[J]. 雷达科学与技术, 2015, 13(3): 233-239.  
HU Yuankui, JIN Xueming, FAN Zhongliang. Research on multi-function integrated RF system technology[J]. Radar Science and Technology, 2015, 13(3): 233-239. (in Chinese)
- [3] HEMMI C, DOVER R T, VESPA A, et al. Advanced shared aperture program (ASAP) array design [C]//Proceedings of International Symposium on Phased Array Systems and Technology. [S. l.]: IEEE, 1996: 278-282.
- [4] MOO P W, DIFILIPPO D J. Overview of naval multifunction RF systems [C]//Proceedings of the 15th European Radar Conference (EuRAD). [S. l.]: IEEE, 2018: 178-181.
- [5] 姚迪,赵楠,杜晓佳. 美军综合集成上层建筑(InTop)演示验证项目探析[J]. 舰船科学技术, 2019, 41(5): 149-153.  
YAO Di, ZHAO Nan, DU Xiaojia. U. S. naval integrated topside prototype programme [J]. Ship Science and Technology, 2019, 41(5): 149-153. (in Chinese)
- [6] 薛慧,张昊. 机载多功能综合射频一体化发展研究[J]. 中国电子科学研究院学报, 2016, 11(5): 532-539.  
XUE Hui, ZHANG Hao. Research on airborne multifunctional RF integration system [J]. Journal of CAE-IT, 2016, 11(5): 532-539. (in Chinese)
- [7] 薛慧,王虎. 舰载多功能综合射频一体化研究发展现状[J]. 飞航导弹, 2016(8): 46-50.  
XUE Hui, WANG Hu. Research on shipborne multifunctional RF integration system [J]. Aerodynamic Missile Journal, 2016(8): 46-50. (in Chinese)
- [8] OUACHA A, FREDLUND A, ANDERSSON J, et al. SE-IT joint M-AESA program: overview and status [C]//Proceedings of 2010 IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology. [S. l.]: IEEE, 2010: 771-776.
- [9] CARULLI V, NORDENBERG R, FREDLUND A, et al. New concepts for MRFS evolutionary trends. The M-AESA program: a joint IT-SE capability driven approach [C]//Proceedings of 2008 IEEE Radar Conference. [S. l.]: IEEE, 2008: 1-8.
- [10] FENG Z, FANG Z, WEI Z, et al. Joint radar and communication: a survey [J]. China Communications, 2020, 17(1): 1-27.
- [11] 肖博,霍凯,刘永祥. 雷达通信一体化研究现状与发展趋势 [J]. 电子与信息学报, 2019, 41(3): 739-750.  
XIAO Bo, HUO Kai, LIU Yongxiang. Development and prospect of radar and communication integration [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2019, 41(3): 739-750. (in Chinese)
- [12] 卢俊,张群飞,史文涛,等. 探测通信一体化研究现状与发展趋势 [J]. 信号处理, 2019, 35(9): 1484-1495.  
LU Jun, ZHANG Qunfei, SHI Wentao, et al. Development and prospect of detection and communication integration [J]. Journal of Signal Processing, 2019, 35(9): 1484-1495. (in Chinese)
- [13] 梁兴东,李强,王杰,等. 雷达通信一体化技术研究综述 [J]. 信号处理, 2020, 36(10): 1615-1627.  
LIANG Xingdong, LI Qiang, WANG Jie, et al. Joint wireless communication and radar sensing: review and future prospects [J]. Journal of Signal Processing, 2020, 36(10): 1615-1627. (in Chinese)
- [14] 刘凡,袁伟杰,原进宏,等. 雷达通信频谱共享及一体化: 综述与展望 [J]. 雷达学报, 2021, 10(3): 467-484.  
LIU Fan, YUAN Weijie, YUAN Jinhong, et al. Radar-communication spectrum sharing and integration: overview and prospect [J]. Journal of Radars, 2021, 10(3): 467-484. (in Chinese)
- [15] MA D, SHLEZINGER N, HUANG T, et al. Joint radar-communication strategies for autonomous vehicles: combining two key automotive technologies [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2020, 37(4): 85-97.
- [16] MEALEY R M. A method for calculating error probabilities in a radar communication system [J]. IEEE Transactions on Space Electronics and Telemetry, 1963, 9(2): 37-42.
- [17] FIDEN W H, CZUBIAK D W. Radar-compatible data link system (U): US 05626674 [P]. 2007-11-20.

- [18] BARRENECHEA P, ELFERINK F, JANSSEN J. FMCW radar with broadband communication capability[C]//Proceedings of 2007 European Radar Conference. [S. l.]: IEEE, 2007: 130-133.
- [19] CHEN X B, WANG X M, ZHANG Z, et al. A communication with LFM carrier modulated by MSK scheme[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Computational Photography. Seattle, USA: [s. n.], 2012: 461-463.
- [20] 王诏丰, 廖桂生, 杨志伟. 一种步进 MFSK 调制的雷达通信共享信号设计方法[J]. 系统工程与电子技术, 2016, 38(8): 1758-1763.  
WANG Zhaofeng, LIAO Guisheng, YANG Zhiwei. Signal design method for integrated radar and communication based on step multi-frequency shift keying [J]. System Engineering and Electronic, 2016, 38(8): 1758-1763. (in Chinese)
- [21] ZHANG Q, ZHOU Y, ZHANG L, et al. Waveform design for a dual-function radar-communication system based on CE-OFDM-PM signal[J]. Radar, Sonar & Navigation, IET, 2018, 13(4): 566-572.
- [22] 张秋月, 张林让, 谷亚彬, 等. 恒包络 OFDM 雷达通信一体化信号设计[J]. 西安交通大学学报, 2019, 53(6): 77-84.  
ZHANG Qiuyue, ZHANG Linrang, GU Yabin, et al. Signal design of communication integration for radars with constant envelope OFDM[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019, 53(6): 77-84. (in Chinese)
- [23] NOWAK M J, ZHANG Z, LOMONTE L, et al. Mixed-modulated linear frequency modulated radar-communications [J]. Radar, Sonar & Navigation, IET, 2016, 11(2): 313-320.
- [24] SAHIN C, JAKABOSKY J, MCCORMICK P M, et al. A novel approach for embedding communication symbols into physical radar waveforms[C]//Proceedings of 2017 IEEE Radar Conference. [S. l.]: IEEE, 2017: 1498-1503.
- [25] SADDIK G N, SINGH R S, BROWN E R. Ultra-wideband multifunctional communications/radar system[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2007, 55(7): 1431-1437.
- [26] GARMATYUK D, SCHUERGER J, KAUFFMAN K. Multifunctional software-defined radar sensor and data communication system[J]. IEEE Sensors Journal, 2011, 11(1): 99-106.
- [27] STURM C. Waveform design and signal processing aspects for fusion of wireless communications and radar sensing [J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(7): 1236-1259.
- [28] 刘永军. 基于 OFDM 的雷达通信一体化设计方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.  
LIU Yongjun. Study on integrated radar and communication design method based on OFDM [D]. Xi'an: Xidian University, 2019. (in Chinese)
- [29] ELLINGER J, ZHANG Z, WU Z, et al. Dual-use multicarrier waveform for radar detection and communication[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2018, 54(3): 1265-1278.
- [30] WANG F, LI H, GOVONI M A. Power allocation and co-design of multicarrier communication and radar systems for spectral coexistence[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2019, 67(14): 3818-3831.
- [31] WANG J, LIANG X D, CHEN L Y, et al. First demonstration of joint wireless communication and high-resolution SAR imaging using airborne MIMO radar system [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2019, 57(9): 6619-6632.
- [32] HORTON B M. Noise-modulated distance measuring systems[J]. Proceedings of the IRE, 1959, 49(5): 821-828.
- [33] LAI C P, NARAYANAN R M. Ultrawideband random noise radar design for through-wall surveillance [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2010, 46(4): 1716-1730.
- [34] AXELSSON S R J. Random noise radar/sodar with ultrawideband waveforms[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007, 45(5): 1099-1114.
- [35] 刘国岁, 顾红, 苏卫民. 随机信号雷达[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.  
LIU Guosui, GU Hong, SU Weimin. Random signal radars[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005. (in Chinese)
- [36] LI J, STOICA P. MIMO radar signal processing [M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2008.
- [37] TANG B, WANG H, QIN L, et al. Waveform design for dual-function MIMO radar-communication systems [C]//Proceedings of the 11th Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop (SAM). Hangzhou, China: [s. n.], 2020.