

相控阵雷达探通一体化关键技术研究

邢文革^{1,*}, 周传睿^{1,2}, 周 程²

(1. 东南大学信息科学与工程学院, 江苏 南京 210096; 2. 南京电子技术研究所, 江苏 南京 210039)

摘 要: 随着作战平台高集成度建设、多功能整合发展的需求不断提高,相控阵雷达的探通一体化技术成为了当下非常热门的研究领域。本文聚焦于探通一体相控阵雷达的工程实现,采用了一种“时分复用为主,频分复用和空分复用为辅”的优化机制,提出了一种基于异步双时间指针的探通同时多任务资源调度算法,完成了探通一体工作的发射-接收(transmit/receive, T/R)模块前端设计。试验结果表明,本文提出的工程设计能满足探通一体工作的要求,为数字相控阵雷达探通一体化发展提供了一种可行的工程实现方法。

关键词: 相控阵雷达; 发射-接收模块; 探通一体化; 时分复用; 资源调度算法

中图分类号: TN 974

文献标志码: A

DOI:10.12305/j.issn.1001-506X.2022.10.08

Research on key technology of detection and communication integration for phased array radar

XING Wenge^{1,*}, ZHOU Chuanrui^{1,2}, ZHOU Cheng²

(1. College of Information Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing 210039, China)

Abstract: As the demand for high-integration and multi-function combat platforms increases, the detection and communication integration technology of phased array radar becomes a very popular field of research at the moment. This paper focuses on the engineering implementation of detection and communication integration for phased array radar, and designs an optimized mechanism, which uses mainly time division multiplexing, supplemented by frequency and space division multiplexing. This paper proposes a resource scheduling algorithm based on asynchronous dual time pointers for simultaneous multitasks, and implements the transmit/receive (T/R) module front end of detection and communication integration. The experimental results show that the proposed design could meet the requirements of detection and communication integration for phased array radar communication, which could provide a feasible engineering implementation method.

Keywords: phased array radar; transmit/receive (T/R) module; detection and communication integration; time division multiplexing; resource scheduling algorithm

0 引 言

相控阵雷达在先进军事装备上的大量运用为射频资源的一体化应用创造了条件。美国将探通一体化作为雷达等装备的优先发展方向,如 F22 的 APG77 雷达已可实现探通一体工作,还有 SPY-6 雷达也进行了相关技术研究。国内起步相对较晚,相关科研院所和高校对于相控阵雷达的探通一体技术也进行了深入研究,集中

在波形设计及处理^[1-4]、探通架构体系研究^[5-9]等方面,也在试验室条件下开展了工程样机研究^[10-12],但大多数成果对装备建设参考意义有限。此外,我国虽进行了相关能力演示,但典型的时分复用探通工作机制导致通信能力受限,资源利用率不高,传统的雷达射频前端难以支撑高阶通信方式。因此,探通一体工程研究亟需丰富探通工作机制、对资源调度和射频前端设计等技术进一步开展研究。

收稿日期:2022-07-04; 修回日期:2022-07-08; 网络优先出版日期:2022-09-06。

网络优先出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2422.TN.20220906.1030.004.html

* 通讯作者。

引用格式: 邢文革, 周传睿, 周程. 相控阵雷达探通一体化关键技术研究[J]. 系统工程与电子技术, 2022, 44(10): 3053-3058.

Reference format: XING W G, ZHOU C R, ZHOU C. Research on key technology of detection and communication integration for phased array radar[J]. Systems Engineering and Electronics, 2022, 44(10): 3053-3058.

1 工程框架设计

基于现有的雷达结构,本文提出了一种探测通信一体化的处理架构。通信专用设备为网络管理和调制解调,前者负责通信业务数据的处理,后者完成上下行通信数据的调制和解调。

目前已发表的研究成果中,绝大部分关于探通一体的工作机制可以分为 4 种,分别是时分复用、频分复用、空分复用以及特殊波形。其中,时分复用即雷达和通信分别在独立的时间段里实现各自的功能,此类工作机制易于实现,运用广泛,研究成果较多^[13-14]。频分复用为雷达和通信分别在不同的频域进行各自射频信号的生成,两者叠加之后同时收发。国内外学者对于多载波工作和频带间隙工作等方式进行了相关研究^[15-17]。空分复用是指利用数字相控阵雷达的多波束能力,在不同的波束方向分别实现探测和通信功能。国内外学者对于主副瓣复用,多波束复用等方向开展了研究^[18-19]。特殊波形是指采用综合化波形实现目标探测和数据传输功能^[20-24],此种方式局限性较高,离工程应用尚有距离。

为了更好地在现有雷达架构下实现探测通信结合,本文提出了一种“时分复用为主,频分复用和空分复用为辅”的工作机制。

2 关键性工程设计

结合相控阵雷达的基础架构和探通工作机制,首先要梳理探通一体化工程设计实现中的一些重点和难点。图 1 为本文所提探通一体化处理架构示意图,其中,通信专用部分(网管和调制解调)在通信设备中运用广泛,实现成熟;雷达的处理、控制、波形及波束形成部分与探测通信要求一致,无需特别设计;而发射-接收(transmit/receive, T/R)组件和后端资源调度若要实现探通一体化工作,则需要考虑到探测和通信两方面的需求进行新的设计,这是工程实现的重难点。

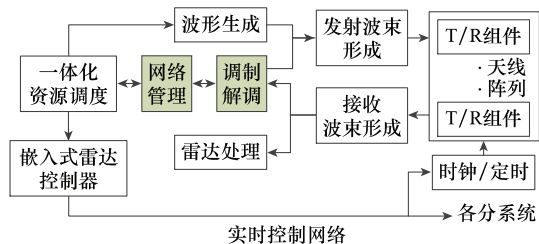


图 1 探通一体实现功能框图

Fig. 1 Detection and communication integration implementation function diagram

对于资源调度,相控阵雷达需设计统一的资源调度,以保证探测和通信的协调工作,由于通信的强时序性要求,该资源调度模块还需要考虑到全局的通信需求,需要在调度成功率和资源利用率两方面达到预计指标。

对于 T/R 组件,探测通信需求有所异同,关键性需求也有所区别,具体列举如表 1 所示。分析可得,T/R 组件需要在保证带内高平坦度和大带宽工作的前提下兼顾探测所需的饱和发射通信所需的线性发射^[18]。面对此问题,需要重点设计 T/R 的发射链路与接收链路。

表 1 探通一体对 T/R 组件需求比较

Table 1 Comparison of T/R modulation requirements of detection and communication integration

射频参数	探测	通信	关键需求
功放通道	饱和放大	高线性度放大	线性度指标提高
功率控制	满功率工作	功率可调	
带内平坦度	较高平坦度要求	高平坦度要求	带内平坦度指标提高
瞬时带宽	大带宽	大带宽	可以共用

2.1 一体化资源调度设计

2.1.1 一体化资源调度设计概述

目前经典的相控阵资源调度思想是时间窗和双门限调度^[25]。在此基础上,有研究人员结合各种优化思想做出了研究^[26-28],但对于探通一体相控阵雷达所需的通信(强同步任务)和探测(单平台任务)一体化调度的研究很少。在本工程设计中,针对多平台之间任务的全局调度问题,考虑到通信收发双方时隙严格对准的需求,本文设计了一种基于异步双时间指针的探通同时多任务资源调度算法。

探通一体的资源调度首先需要与“时分为主,频分和空分为辅”的工作机制相匹配,其次调度设计需要考虑如下 3 项原则。

(1) 优先级原则,即有限的资源优先分给高优先级任务。典型的任务优先级排序为目标跟踪>多站通信>有源搜索>无源搜索>自检工作。

(2) 时间利用原则,即

$$\left| \text{SI} - \sum_{i=1}^N \text{dwell}T_i \right| \rightarrow 0 \quad (1)$$

式中:SI 为当前调度时间间隔总长度; N 为当前调度间隔内调度成功的任务个数; $\text{dwell}T_i$ 为任务 i 驻留时间长度。时间利用原则要求在一个调度间隔内尽可能地安排更多的任务,使得其空闲时间尽可能少,提高系统时间资源利用率。

(3) 期望时间原则:

$$| \exp T_i - \text{excu}T_i | \rightarrow 0 \quad (2)$$

式中: $\exp T_i$ 为任务 i 期望执行时刻; $\text{excu}T_i$ 为任务 i 实际执行时刻。期望时间原则要求每个任务请求的实际执行时刻尽可能靠近其期望执行时刻。建立系统任务模型: $T = \{\text{taskID}, \text{Tasktype}, \text{pri}, \exp T, \text{dwell}T, \text{win}T, \text{excu}T\}$,模型中各参数的含义如表 2 所示。

表 2 模型参数

Table 2 Model parameter

模型参数	说明
taskID	任务号
Tasktype	任务类型,通信和探测两类任务
pri	任务优先级
expT	期望执行时间
dwellT	任务驻留时间
winT	任务可执行时间窗
excuT	任务实际执行时间

其中, $\text{excuT} \in [\text{expT} - \text{winT}, \text{expT} + \text{winT}]$, $\text{expT} - \text{winT}$ 为最早可执行时间; $\text{expT} + \text{winT}$ 为最晚可执行时间或截止时间。

还需定义单个任务收益模型, 记为 $g(T)$, 定义如下:

$$g(T) = \text{pri} + \exp \left[- \left(\frac{\text{expT} + \text{winT} - \text{curT}}{\text{winT}} \right) \right] \quad (3)$$

式中: pri 表示优先级贡献的调度收益; 等号右侧第二项表明时间紧迫性贡献的调度收益。

建立任务模型和调度收益模型之后, 构建该算法流程。定义两类时间指针: 全局通信时间指针和异步独立时间指针。全局通信时间指向当前的分析时刻, 按照调度收益选择适宜执行任务。在此基础上, 各平台独立拥有一个异步独立时间指针, 从单站任务中, 按照调度收益选择与通信任务不冲突的单站任务。本算法通过调度成功率和资源利用率评价算法性能, 并迭代优化至后续调度周期。

2.1.2 一体化资源调度设计试验验证

测试场景: 构建两平台通信、探测的算法验证场景, 在每一个调度周期内, 首先固定产生一个通信任务, 完成平台间必要信息的共享, 然后随机产生 2~3 个通信任务, 通信任务的驻留时间在 2~10 ms 内随机生成。同时, 各节点随机生成单雷达任务, 优先级和驻留时间均随机生成。

测试结果: 调度仿真结果如图 2 所示, 横轴代表统计时间, 纵轴代表任务优先级。通信传输任务优先级最高, 用红色矩形标出。蓝色矩形代表了其他探测任务。从结果看, 双站之间的通信任务保持了严格同步, 其他探测任务由各自平台独立调度完成。整体平均时间资源利用率达到 98% 以上, 资源利用性能良好。

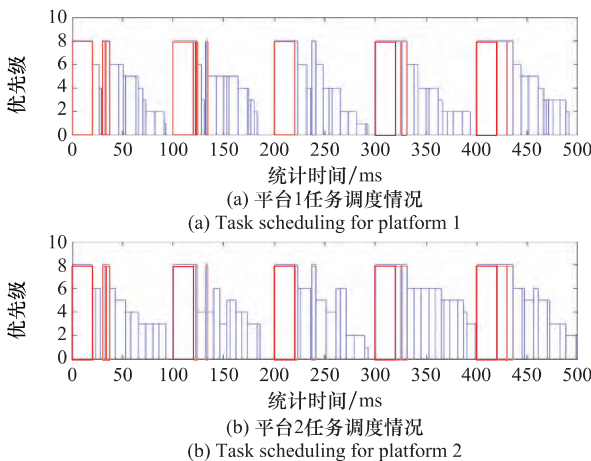


图 2 任务调度情况

Fig. 2 Task scheduling

图 3 中, 纵轴是调度成功率, 对于通信任务, 调度成功率为 100%, 高优先级任务的调度成功率大于等于 99%。从试验结果看, 探测和通信一体化调度成功率高, 资源调度排布合理。

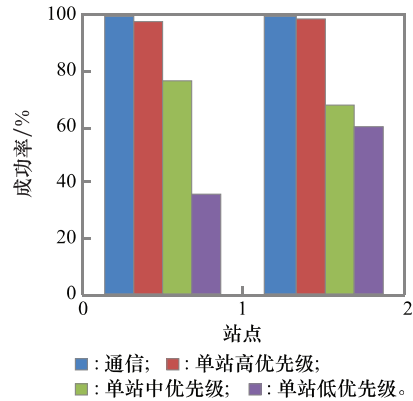


Fig. 3 Success rate of different types of task scheduling

2.2 一体化 T/R 前端设计

2.2.1 一体化 T/R 前端工程设计原理

在发射时, 面对兼顾探测所需的饱和放大和通信所需的线性放大的需求, 典型解决方案是“饱和工作线性回退”。传统的线性功率放大器效率低, 典型值为 20%, 且在功率回退处的效率更低。为了实现更高的效率, 可使用开关型功率放大器并结合线性化技术^[29-30]。常用的线性化技术有前/后反馈、预失真、包络消除和恢复等。除此之外, 还可以专门设计有饱和收发通道和线性收发通道两个工作支路, 饱和通道用于雷达工作, 而增益较小的线性通道用于雷达通信。

一体化 T/R 前端设计以直接数字频率合成 (direct digital frequency synthesis, DDS) 式组件为例, 如图 4 所示。在探测发射时, 切换到饱和发射路, 激励信号经过多级功率放大器进行饱和放大, 最终输出; 通信发射时, 使用线性支路, 无需经过多级功率放大, 在发射驱动后直接由环形器输出, 同时配合前述的线性化技术实现 T/R 组件的线性工作。在接收时, 限幅低噪放环节考虑探测和通信时动态需求的不同, 设计有“高增益低噪声”和“大动态低增益”两种工作模式, 对探测和通信接收分别处理。

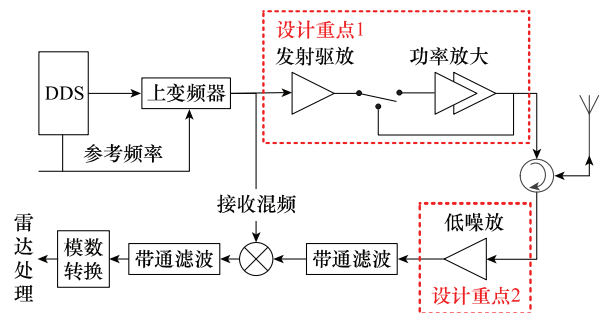


图 4 一体化 T/R 前端设计原理 (以 DDS 式组件为例)

Fig. 4 Design principle of integrated T/R front end (taking DDS type component as an example)

2.2.2 一体化 T/R 前端试验验证

首先对带内平坦度和工作线性度进行验证, 使用 T/R 组件和测试仪器搭建测试场景, 如图 5 所示。

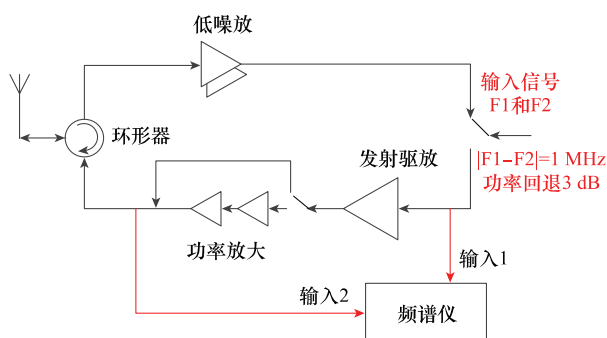


图 5 T/R 前端平坦度和线性度测试场景

Fig. 5 Flatness and linearity test scenarios of T/R front end

带内平坦度测试方法:将射频通道的激励输入、发射驱动输出和功率放大输出引出,接到频谱仪中进行测量,记录数据并分析结果。

指标描述:使用带内增益起伏 ΔG 描述,为在设计通带内最大增益 G_{\max} 和最小增益 G_{\min} 之差: $\Delta G = G_{\max} - G_{\min}$ 。

工作线性度测试方法:将功率回退 3 dB 间隔的 1 MHz 的双音信号使用功率合成器合成为满功率信号输入 T/R 组件,将功率放大输出接至频谱仪测量。

指标描述:使用三阶互调分量 (third-order intermodulation, IMD3) 和基频分量之差描述。

测试结果如下。

(1) 带内平坦度

图 6 是一次测试中单通道通带内射频功放的带内增益曲线,增益幅度起伏控制在 0.8 dB 内。统计多通道测试数据,最终的带内增益幅度起伏小于等于 1 dB。

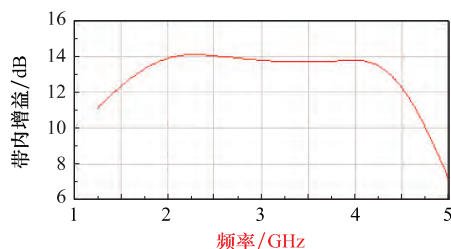


图 6 射频功放的带内增益曲线

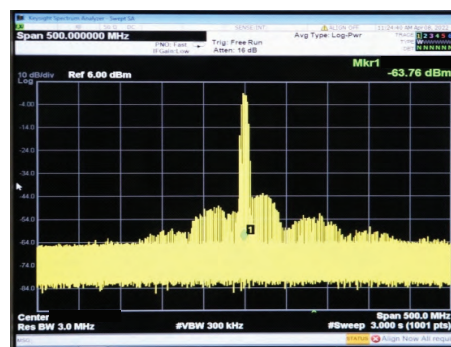
Fig. 6 Inband gain curve of radio frequency power amplifier

(2) 工作线性度

测试得到三阶互调小于等于 -25 dBc。从试验结果看,T/R 组件的关键性指标满足探测通信工作的要求。然后对探通工作进行验证。

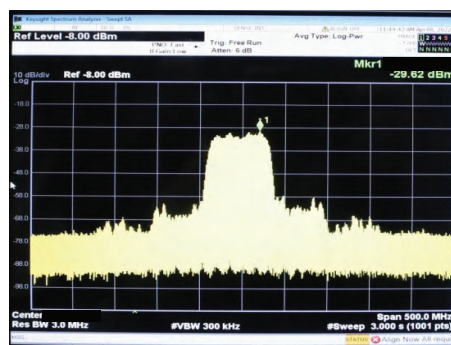
测试场景:测试 T/R 前端在探测和通信两种工作模式下的输出信号,验证能否正常工作,关键指标是否符合要求。

测试结果:实测结果如图 7 所示,图 7(a)和图 7(c)分别为探测工作测试的频谱图和时域图,图 7(b)和图 7(d)分别为通信工作测试的频谱图和时域图。在探测模式下,T/R 前端能够实现窄带宽脉冲式工作,增益满足要求。在通信模式下,T/R 前端能够实现大带宽,近连续波工作(依帧调度的连续波),波形相关指标符合要求。整体测试结果表明,该 T/R 前端设计能够满足探测通信一体化工作。



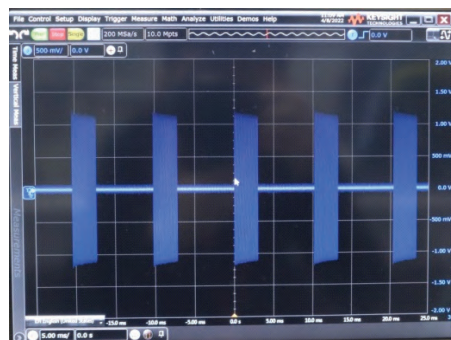
(a) 探测工作频谱图

(a) Spectrogram of detection work



(b) 通信工作频谱图

(b) Spectrogram of communication work



(c) 探测工作时域图

(c) Time domain diagram of detection work



(d) 通信工作时域图

(d) Time domain diagram of communication work

图 7 探通一体工作实测图

Fig. 7 Detection and communication integration work measurement

3 探通一体工作整体性能验证

3.1 试验场景

采用两部探通一体的数字相控阵雷达构建探测和通信场景,验证探通一体的工程设计,如图 8 所示。场景中,两部雷达通信一体化设备部署于视距内,对空中目标独立进行探测;与此同时,利用相控阵阵面建立通信链路,传输探测等信息。

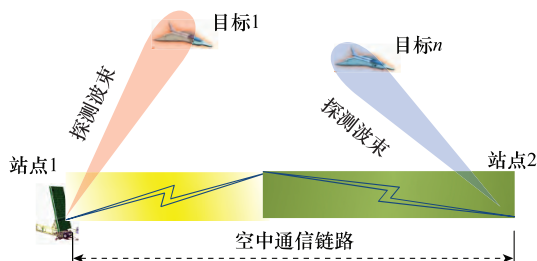


图 8 试验验证场景

Fig. 8 Experiment verification scenario

3.2 试验结果

试验期间,通信的传输瞬时速率达到了百兆比特量级,误码率在 10^{-6} 以下,部分试验结果如表 3 所示。通过对接收信号的信噪比进行分析,通信性能如图 9 所示,和理论性能相比损失 2.5 dB。

表 3 误码率

Table 3 Bit error rate

测试序号	接收总比特数	误比特数	误码率
1	874 188 960	326	3.73×10^{-7}
2	822 699 360	549	6.67×10^{-7}
3	1 237 741 200	569	4.60×10^{-7}

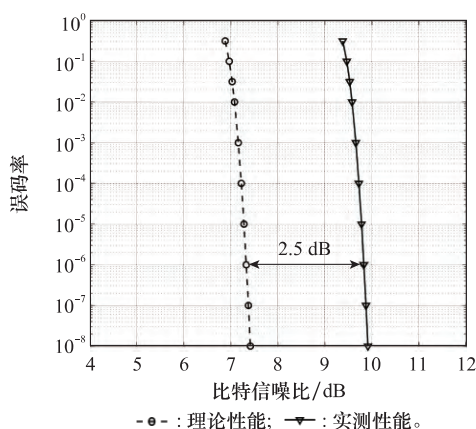


图 9 系统通信性能曲线

Fig. 9 System communication performance curve

试验期间,两节点目标探测的统计结果如表 4 所示。两节点雷达搜索、跟踪数据率均和单雷达探测性能一致,探测任务顺利完成。

表 4 探测性能

Table 4 Detection performance

探测目标	探测状态	搜索平均数据率/s	跟踪平均数据率/s
1	单探测状态	10.5	2
2	单探测状态	11.2	2
3	探通一体状态	11.7	2
4	探通一体状态	12.0	2

在试验过程中,两站点数字相控阵雷达实现了一体化的探测和通信,期间在保证探测能力的前提下实现了高通信效率传输^[91]。

4 结束语

本文利用数字相控阵雷达的波束控制敏捷、时频资源丰富、调度处理强大的优势,提出了一种“时分复用为主,频分复用和空分复用为辅”的工作机制,设计并完成了射频综合工程设计,实现了数字相控阵雷达探通一体工作,实测结果显示,该设计能满足探通一体化工作的相关要求。未来随着相控阵雷达新技术的不断运用,可进一步扩展雷达的通信能力,为网络化作战提供灵活柔性的链接手段;同时可加强探通一体雷达的作战应用研究,丰富网络化雷达作战理论。

参考文献

- [1] XIAO Z Q, ZENG Y. Waveform design and performance analysis for full-duplex integrated sensing and communication[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2022, 40(6): 1823–1837.
- [2] LIU Y J, LIAO G S, XU J W, et al. Adaptive OFDM integrated radar and communications waveform design based on information theory[J]. IEEE Communications Letters, 2017, 21(10): 2174–2177.
- [3] YU X X, YAO X, YANG J, et al. Integrated waveform design for MIMO radar and communication via spatio-spectral modulation[J]. IEEE Trans. on Signal Processing, 2022, 70: 2293–2305.
- [4] ZHANG Y, LI Q Y, HUANG L, et al. Waveform design for joint radar-communication system with multi-user based on MIMO radar[C]//Proc. of the IEEE Radar Conference, 2017: 415–418.
- [5] FENG Z Y, FANG Z X, WEI Z Q, et al. Joint radar and communication: a survey[J]. China Communications, 2020, 17(1): 1–27.
- [6] 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): 236–247.
XIAO B, HUO K, LIU Y X. Development and prospect of radar and communication integration[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2019, 41(3): 236–247.
- [7] HAN J R, WEI Z Q, MA L, et al. A multiple access method for integrated sensing and communication enabled UAV Ad Hoc network[C]//Proc. of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference, 2022: 184–188.
- [8] ZHANG H B, ZHANG H L, DI B Y, et al. Holographic integrated sensing and communication[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2022, 40(7): 2114–2130.
- [9] QIAN J H, LOPS M, ZHENG L, et al. Joint system design for

- coexistence of MIMO radar and MIMO communication[J]. IEEE Trans. on Signal Processing, 2018, 66(13): 3504–3519.
- [10] 黄鹤. 雷达-通信一体化系统设计[J]. 雷达科学与技术, 2014, 12(5): 460–464.
HUANG H. Design of integrated radar and communication system[J]. Radar Science and Technology, 2014, 12(5): 460–464.
- [11] TANG A M, WANG X D. Self-interference-resistant IEEE 802.11ad-based joint communication and automotive radar design[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2021, 15(6): 1484–1499.
- [12] ZHENG L, LOPS M, ELDAR Y C, et al. Radar and communication coexistence: an overview; a review of recent methods[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2019, 36(5): 85–99.
- [13] JIANG M C, LIAO G S, YANG Z W, et al. Tunable filter design for integrated radar and communication waveforms[J]. IEEE Communications Letters, 2021, 25(2): 570–573.
- [14] HUSSAIN I, WU K. Concurrent dual-band heterodyne interferometric receiver for multistandard and multifunction wireless systems[J]. IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, 2021, 69(11): 4995–5007.
- [15] CHU J J, LIU R, LIU Y, et al. Joint transmit beamforming design for secure communication and radar coexistence systems[C]//Proc. of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference, 2022: 205–209.
- [16] LIU C G, CHEN Y F, YANG S H. Deep learning based detection for communications systems with radar interference[J]. IEEE Trans. on Vehicular Technology, 2022, 71(6): 6245–6254.
- [17] ZHENG L, LOPS M, WANG X D, et al. Joint design of overlaid communication systems and pulsed radars [J]. IEEE Trans. on Signal Processing, 2017, 66(1): 139–154.
- [18] HASSANIEN A, AMIN M G, ZHANG Y D, et al. Dual-function radar-communications using phase-rotational invariance[C]//Proc. of the 23rd European Signal Processing Conference, 2015: 1346–1350.
- [19] HASSANIEN A, AMIN M G, ZHANG Y D, et al. Dual-function radar-communications: information embedding using side-lobe control and waveform diversity[J]. IEEE Trans. on Signal Processing, 2015, 64(8): 2168–2181.
- [20] 姜孟超, 廖桂生, 杨志伟, 等. 一种 NLFM-CPM 雷达通信一体化信号设计[J]. 系统工程与电子技术, 2019, 9(1): 35–42.
JIANG M C, LIAO G S, YANG Z W, et al. Signal design for integrated radar and communication based on NLFM-CPM[J]. Systems Engineering and Electronics, 2019, 9(1): 35–42.
- [21] 贺占权, 李晓青, 倪远涵. 基于变速率的高吞吐率 LFM-BPSK 一体化波形[J]. 计算机应用与软件, 2020, 37(5): 114–117.
HE Z Q, LI X Q, NI Y H. High throughput LFM-BPSK integrated waveform based on variable rate[J]. Computer Applications and Software, 2020, 37(5): 114–117.
- [22] MULLER E B, SILVA V N H, MONTEIRO P P, et al. Joint optical wireless communication and localization using OFDM[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2022, 34(14): 757–760.
- [23] LI H S. Dual-function multiplexing for waveform design in OFDM-based joint communications and sensing: an edgeworth box framework [C]//Proc. of the IEEE 23rd International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communication, 2022.
- [24] GENG Z, XU R H, DENG H, et al. Fusion of radar sensing and wireless communications by embedding communication signals into the radar transmit waveform[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2018, 12(6): 632–640.
- [25] YI W, YUAN Y, HOSEINNEZHAD R, et al. Resource scheduling for distributed multi-target tracking in netted colocated MIMO radar systems[J]. IEEE Trans. on Signal Processing, 2020, 68: 1602–1617.
- [26] WU L L, MISHRA K V, SHANKAR M R B, et al. Resource allocation in heterogeneously-distributed joint radar-communications under asynchronous Bayesian tracking framework[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2022, 40(7): 2026–2042.
- [27] AHMED A, ZHANG Y D, HIMED B. Distributed dual-function radar-communication MIMO system with optimized resource allocation[C]//Proc. of the IEEE Radar Conference, 2019.
- [28] HUANG T Y, SHLEZINGER N, XU X Y, et al. MAJoR-Com: a dual-function radar communication system using index modulation[J]. IEEE Trans. on Signal Processing, 2020, 68: 3423–3438.
- [29] PENGELLY R, FAGER C, OZEN M. Doherty's legacy: a history of the doherty power amplifier from 1936 to the present day[J]. IEEE Microwave Magazine, 2016, 17(2): 41–58.
- [30] KATO K, MIWA S, TERANISHI E, et al. A 83-W, 51% GaN HEMT doherty power amplifier for 3.5-GHz-band LTE base stations[C]//Proc. of the IEEE 46th European Microwave Conference, 2016: 572–575.
- [31] NARTASILPA N, SALIM A, TUNINETTI D, et al. Communications system performance and design in the presence of radar interference[J]. IEEE Trans. on Communications, 2018, 66(9): 4170–4185.

作者简介

邢文革(1965—),男,研究员,博士研究生,主要研究方向为雷达及通信系统。

周传睿(1985—),男,研究员,博士研究生,主要研究方向为雷达及通信系统。

周程(1994—),男,工程师,硕士,主要研究方向为雷达系统。