

一种基于时间调制的弹性化 SAR 卫星系统

曹岸杰¹, 王 辉¹, 刘庆波², 成 飞¹

(1. 上海卫星工程研究所, 上海 201109; 2. 上海无线电设备研究所, 上海 201109)

摘要:星载合成孔径雷达(SAR)系统能全天时、全天候观测,在地震、洪涝、台风等自然灾害监测中具有重要作用。双基、多基 SAR 卫星更具有极高的经济、科学、安全价值。然而,目前在轨的大型星载 SAR 卫星造价昂贵,且双基 SAR 卫星需数颗同等规模的卫星。双基 SAR 卫星系统存在星间同步链路,因此卫星可扩展性不强。提出了一种基于时间调制的低成本弹性化 Ka 波段调频连续波(FMCW)SAR 小卫星星座系统。该系统基于一组独立、模块化的发射卫星和接收卫星。采用 Ka FMCW SAR 体制和时间调制天线(TMA)技术,可减轻接收星 2/3 以上的质量。该系统采用自主任务规划技术,具备多样化的工作模式,为单发多收、多发多收等应用需求提供了一种弹性化的解决方案。

关键词:Ka 波段; 调频连续波; 合成孔径雷达; 时间调制天线; 自主任务规划; 弹性化小卫星系统

中图分类号:V 443.5

文献标志码:A

DOI:10.19328/j.cnki.1006-1630.2018.06.009

A Novel Expandable SAR Satellite System Based on Time Modulated Antenna

CAO Anjie¹, WANG Hui¹, LIU Qingbo², CHENG Fei¹

(1. Shanghai Institute of Satellite Engineering, 201109 Shanghai, China;

2. Shanghai Radio Equipment Research Institute, 201109 Shanghai, China)

Abstract: The space-borne synthetic aperture radar (SAR) system is playing an important role, with all weather and all time observation capability, in monitoring earthquake, flood, typhoon and other nature disasters. Bistatic and multistatic SAR systems proposed recently also have a high potential for scientific, commercial and security applications. However, the cost of large SAR satellites in orbit is tremendously high. Bistatic system usually needs several identical satellites. On account of the synchronization link, the system is lack of expandability. Therefore, this paper introduces the concept of a novel low-cost microsatellite system based on Ka-band frequency modulated continuous wave (FMCW) SAR system. It is composed of a set of mutually separated transmitter and receiver satellites. By adopting FMCW SAR and time modulated antenna (TMA) concept, mass and cost of the satellite will be significantly reduced. With autonomous task planning, this system can possess diversified observation modes, providing an expandable solution for single-input single-output (SISO) mode, single-input multiple-output (SIMO) mode or even multiple-input multiple-output (MIMO) mode.

Keywords: Ka-band; frequency modulated continuous wave (FMCW); synthetic aperture radar (SAR); time modulated antenna (TMA); autonomous task planning; expandable microsatellite system

0 引言

近年来,星载高分辨率遥感技术得到了迅速发展。高分辨率遥感卫星的遥感数据在对大型自然灾害的灾害响应、灾情实时监测、灾后重建等方面发挥了重要作用^[1]。目前,基于光学图像的地震灾害灾

后评估技术已发展得较为成熟,许多研究人员在该领域开展了大量的研究工作。但自然灾害往往伴随着恶劣天气,如 2008 年 5 月 12 日汶川地震后,由于重灾地区位于青藏高原东部边缘,降水量与降水频率极高;2014 年威马逊台风登陆海口时,天空云层

覆盖密集。多变的天气、光照强度有时会影响卫星光学有效载荷的观测效果,降低观测精度、观测频率,无法及时、准确地获取受灾地区情况。

SAR 卫星可提供全天时、全天候、高分辨率的图像遥感数据,在第一时间获得灾区受灾情况的分布情况,并能提供实时、准确的监测信息,对应急救援、灾害评估的意义重大。然而,SAR 卫星载荷功耗巨大、幅宽有限一定程度上限制了卫星广域成像或多目标详细观测的能力。同时,SAR 卫星庞大的微波组件规模与基线尺寸也限制了卫星在轨数量。

随着双基/多基 SAR 卫星系统的提出^[2],SAR 卫星突破了外形包络、发射质量带来的制约,具有更灵活的观测基线设计和更多样化的工作模式。随着毫米波射频器件日益成熟与星载调频连续波 SAR 载荷技术飞速发展,SAR 卫星具备了小型化、多模式的发展潜质。德国宇航中心(DLR)在 TerraSAR-X 卫星成功发射后,开展了 Tandem-X 卫星的研制与发射工作;荷兰开展了基于 X 波段 FMCW SAR 卫星 PanelSAR 的研制工作;法国提出了 Cartwheel 卫星星座。然而,现有的双基/多基 SAR 卫星均采用相同设计,因此规模与成本也相应增加。双基/多基

SAR 卫星采用独立的本振调制与解调,需通过星间同步链路保障 SAR 载荷的性能,增加了卫星复杂度,同时降低了系统的可扩展性。

为了解决上述问题,本文提出了一种弹性化小卫星星座系统。基于调频连续波技术、时间调制阵列技术、自主任务规划技术,提供了一种小型化、模块化、低成本的多基观测系统方案,为后续多基卫星观测系统的发展提供了弹性化的解决思路。

1 系统概述

弹性化卫星系统的结构如图 1、2 所示,该系统由发射星和接收星 2 类卫星组成。发射星配置了 Ka FMCW SAR 发射载荷,接收星配置了 Ka FMCW SAR 接收载荷。该系统既可双星组网观测,也可依据观测幅宽、应用需求进行弹性化组网观测。卫星均配置了全球掩星探测仪(GNSS),用于高精度校时,提供全球掩星观测数据;卫星还配置了基于时间调制天线的电磁信号遥感载荷,用于广域搜救、引导 SAR 自主成像等。其中,发射星配置了用于 SAR 成像背景辐射校正的多通道微波辐射计(MWS)。

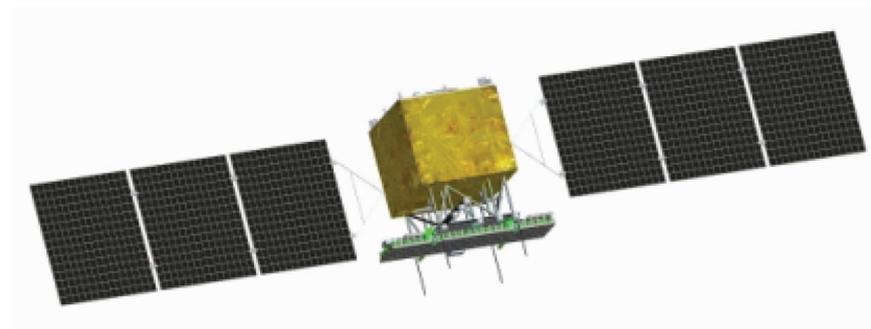


图 1 发射星结构

Fig. 1 Structure of proposed transmitter satellite

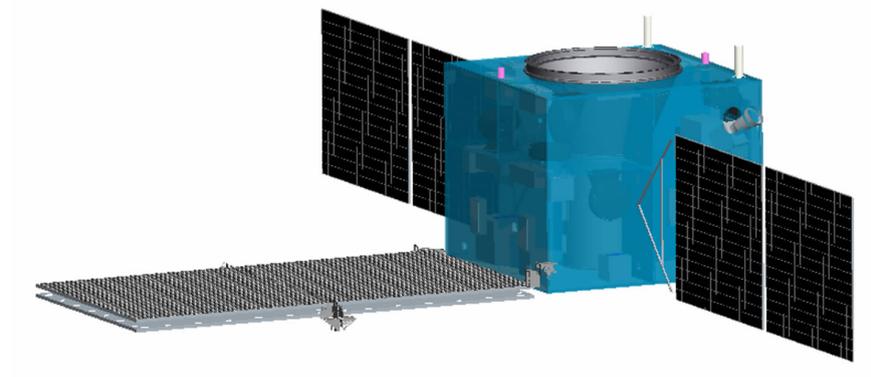


图 2 接收星结构

Fig. 2 Structure of proposed receiver satellite

该系统的一大优势是能以较低接收星研制成本实现高精度双基/多基观测。Ka FMCW SAR 的引入不仅使卫星具备了准光学的观测能力,而且大幅降低了在轨实时处理的复杂度。由于该系统可以在不同的星座构型下弹性化运行,具有单发射单接收(SISO)、单发射多接收(SIMO)、多发射多接收(MIMO)等不同模式,可以满足可变幅宽成像、洋流测速甚至层析观测的要求,因此需要通过自主任务规划系统以满足实时和准确的监测要求。随着临近灾区或接收到求救信号的定位,星载任务规划算法通常在一定时间(约 5 s)内积累目标信息,形成特征集,然后卫星选择相应的模式进行最优观测,基于统一观测基准调度卫星完成姿态机动并完成高分辨率成像。由于灾区建筑物和地理特征会因为灾情受到

破坏,影响回波信号强度和背景的亮温信息。卫星通过周期性调用检测算法,对图像与遥感数据中纹理的差异进行识别,从而规划 10 s 后的观测工作。



图 3 基于地标的任务机动

Fig. 3 Attitude maneuver based on unified benchmark

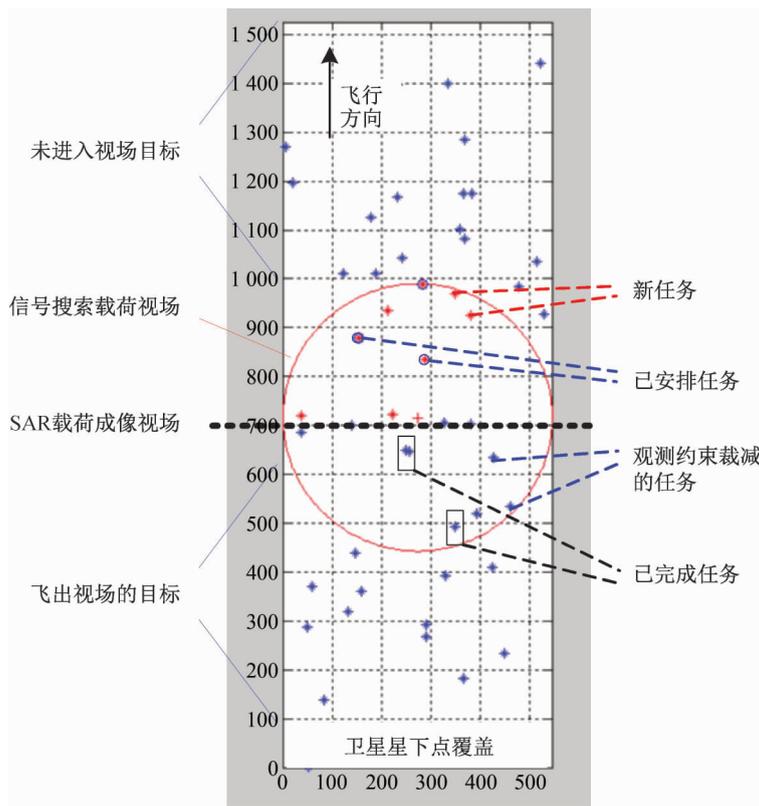


图 4 自主任务规划

Fig. 4 Autonomous task planning

系统另一个优势是基于星簇特点,简化了星间同步方案。现有方案的主要方法有:基于星间同步链路传递连续高稳频率源信号的相位同步、基于双向脉冲交换的相位同步、高稳频率源结合地面控制点的方法、基于直达波传递的相位同步、交替双站模式相位同步等。但上述方法需通过复杂的星间/星

地通信链路来实现。通过将接收星简化为“空间路由器”结构,直接将接收系统收到的雷达回波信号转发至发射星,避免了星间相位同步带来的额外资源开销。接收星仅作为空间路由器,实时转发回波信号。通过简化星载数据存储、数传等分系统结构,由于 Ka FMCW 体制在低峰值发射功率方面具有优

势,简化后接收星的质量仅为同指标下传统卫星方案的 1/3,能在保障系统性能的同时,大幅减轻发射质量,降低研制成本,使系统更灵活。

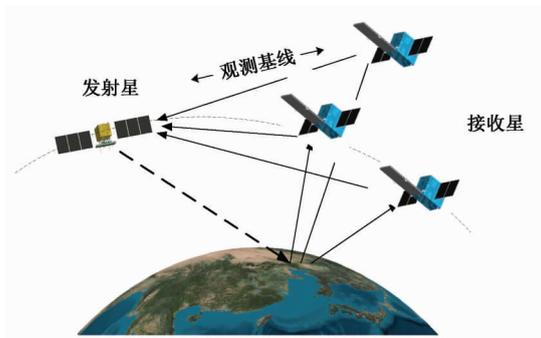


图 5 可扩展星座结构

Fig. 5 Expandable satellite constellation architecture

2 同步链路简化

为了进一步简化卫星结构,系统借鉴了类似“空间路由器”的概念,省去了目前收发分置式星载 SAR 系统中采用的星间双向相位同步链路。为了不影响系统性能,雷达信号在接收-转发路径中的相位变化量必须保证恒定可控。为了保证发射星接收到来自多个接收星的回波且互不干扰,接收星需通过多载波频率调制回波数据。然而,无双向同步链路的传统混频器调制手段将引入额外的相位误差。通过引入时间调制阵列系统^[3],在射频端对回波进行调制,由于时间调制的本质是阵列信号的时间维度解耦^[4],因此可以避免额外的相位误差^[5]。在此基础上,时间调制阵列还提供了一种空分复用的小型化解决方案。接收星和发射星载荷的原理框图如图 6、图 7 所示。

时间调制阵列系统通过控制转发天线阵列中射频的开关状态^[6],改变每个天线单元的工作状态,并通过天线阵列系统对信号进行调制。该方式下的天线只具有通、断 2 种状态,不会引入相位误差,系统将谐波的功率聚焦到发射星接收天线方向,并按照预先频分复用的约定,完成载波频率偏移^[7]。发射星同样采用时间调制阵列完成多回波频分空分转发信号的接收,利用多个谐波指向完成不同空间指向与频率偏移^[8]。卫星系统观测模式如图 8 所示。

射频开关的通、断会产生各次谐波,通常情况下这些谐波被视为能量损失,而在高速射频开关对每个天线单元工作状态周期性的改变下,各次谐波能量在空间上耦合,天线单元的幅相改变等效于低旁

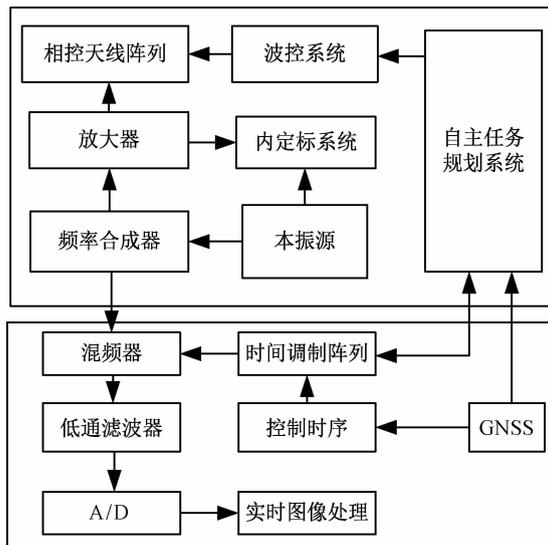


图 6 发射星载荷原理框图

Fig. 6 Schematic diagram of transmitters

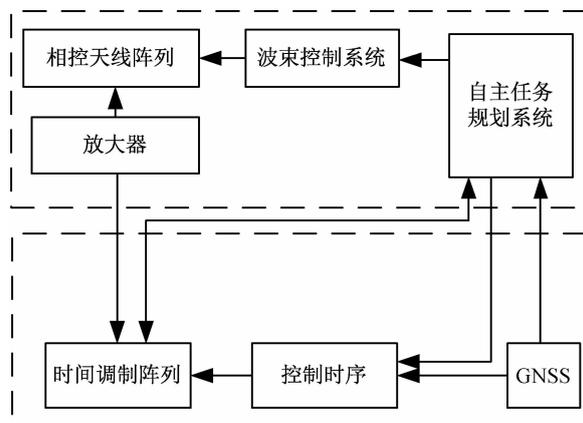


图 7 接收星载荷原理框图

Fig. 7 Schematic diagram of receivers

瓣的离散泰勒分布^[9-13]。

为了验证自适应时间调制天线阵系统的性能,假设了应用场景,开展了仿真工作。 $\tau_{i, on}$ 、 $\tau_{i, off}$ 表示第 i 个开关的导通和关闭时间,用于改变各次谐波的波束指向,其表达式为

$$\begin{cases} \tau_{i, on} = \text{mod} \left[\frac{(i-1) \sin \theta}{2}, 1 \right] \frac{1}{f_p} - \frac{\epsilon T_i}{2} \\ \tau_{i, off} = \text{mod} \left[\frac{(i-1) \sin \theta}{2}, 1 \right] \frac{1}{f_p} + \frac{\epsilon T_i}{2} \end{cases} \quad (1)$$

式中: f_c 为载波频率; T_i 为控制序列的时间周期,决定了迁移频率 f_p 。

当信号从与法线夹角 θ° 处射入时,第 i 个天线阵收到的信号表示为

$$s_i(t) = e^{-j(n-1)Kd \sin \theta} e^{j\omega_c t} \quad (2)$$

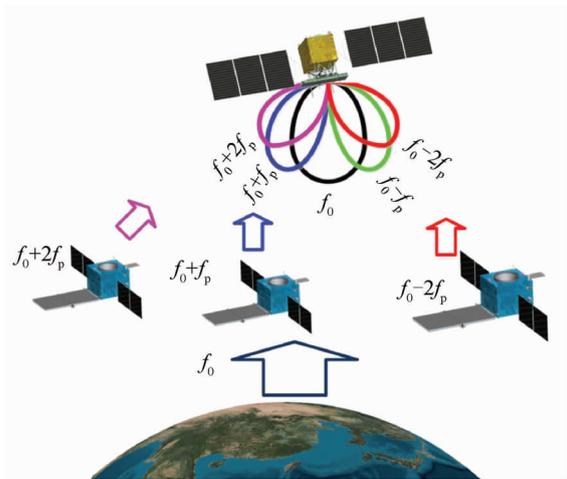


图 8 观测模式示意图

Fig. 8 Schematic diagram of observation mode

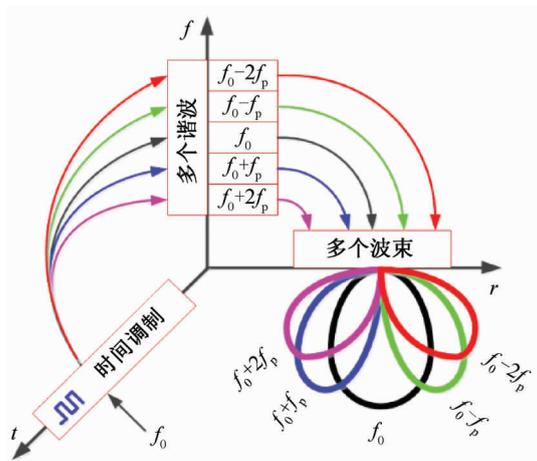


图 9 时间调制阵列原理

Fig. 9 Principle of TMA

描述波束方向图可表示为

$$AP_k(\theta) = \sum_{i=1}^N a_{i,k} e^{-j(n-1)Kd \sin \theta} \quad (3)$$

以一个 16 元天线阵列的转发系统为例,由图 10 中的控制序列进行调制,天线波束的方向结果如图 11 所示。天线阵列同时产生正 1 次谐波指向 10° 方向,产生负 3 次谐波指向 -30° 方向,2 个波束的频率差为 $4/T_p$,同时满足了空分复用与频分复用的需求。

在发射星端,针对多颗接收星的转发需求,采用 16 单元二维时间调制阵列天线,形成空间波束指向间隔 20° 的 5 个独立波束。在保障主星和各接收星同时具有独立链路的情况下,完成回波的载频回迁,用于数据处理。

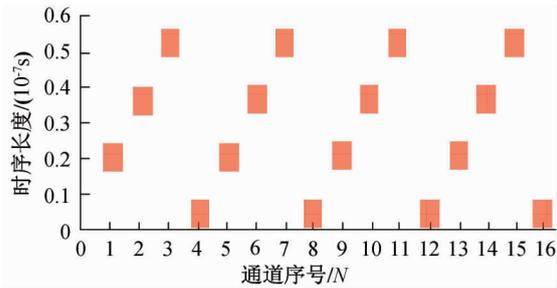


图 10 控制时序

Fig. 10 Control sequence

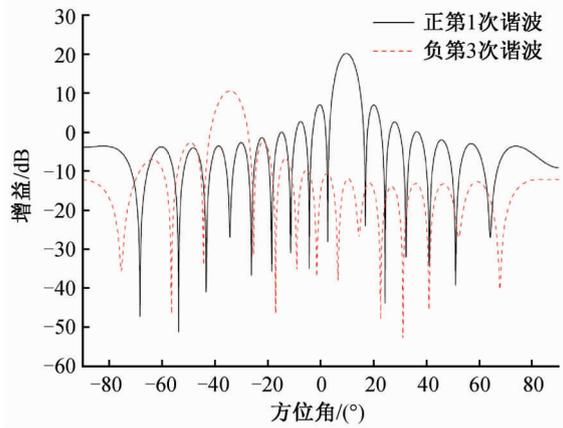


图 11 波束方向图

Fig. 11 Beam pointing pattern

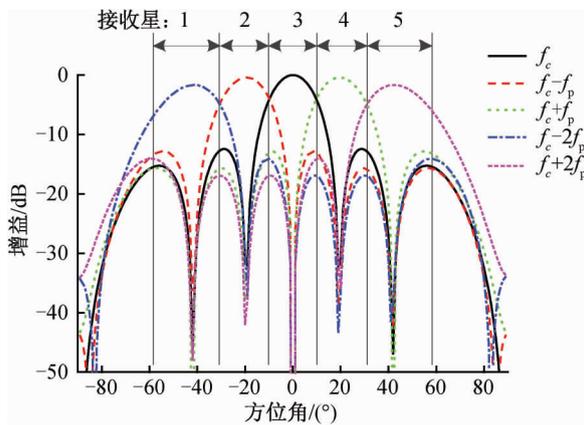


图 12 发射天线波束方向图

Fig. 12 Pointing pattern of transmitter

3 发展展望

基于时间调制阵列的结构特性,可将接收星进一步简化为图 13 中的“透视路由”,即将接收天线使用的时间调制阵列替代相控阵列天线,对地面天

线通过高速时序调制,形成高增益、低旁瓣的对地扫描波束,在收到回波的同时,完成载频迁移,由对天面天线辐射在空间耦合形成波束。初步设计结果表明,同增益下的透视天线系统的质量是原有“相控阵+时间调制阵列”系统的 1/5。采取上述的“透视路由”使卫星系统具备了弹性化高分辨率宽幅 SAR 成像能力,也使全球数字高程模型 (DEM) 的探测精度有望进一步提升。未来,系统低成本会带来多样化的基线设计,使星座系统可适应洋流监测、冰盖厚度测量、植被特性监测等一系列探测应用需求。

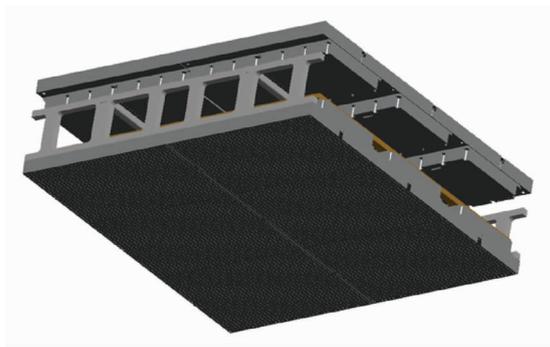


图 13 透视天线

Fig. 13 Perspective antenna

4 结束语

针对星载双基/多基 SAR 卫星观测小型化、多模式的需求,本文采用 Ka FMCW SAR 技术和时间调制阵列技术,基于弹性化卫星星座系统结构,提出了一种基于时间调制的弹性化 SAR 卫星系统。与传统的大型双基/多基 SAR 卫星相比,该系统有效简化了卫星系统设计,省去了接收星数传、存储等星上分系统,避免了星间同步链路产生。同时可根据不同观测任务的需要,提供了一种频分、空分的“空

间路由”架构,增强了系统的可扩展性、灵活性。后续还将针对时间调制阵列,开展基于“透视路由”的天线小型化设计。

参考文献

- [1] 陈筠力,李威. 国外 SAR 卫星最新进展与趋势展望[J]. 上海航天, 2016, 33(6): 1-19.
- [2] 蔡爱民,王燕宇. 双/多基地 SAR 成像研究进展及趋势及其关键技术[J]. 上海航天, 2016, 33(4): 112-118.
- [3] 王新宽,帅春江. 时间调制准泰勒阵列天线的方向图综合[J]. 陕西理工大学学报(自然科学版), 2017, 33(5): 37-42.
- [4] 杜海明,付川南. 基于时间调制阵列的单通道测向估计方法[J]. 探测与控制学报, 2017, 39(1): 111-115.
- [5] SHAN C Z, MA Y K, ZHAO H L, et al. Joint radar-communications design based on time modulated array[J]. Digital Signal Processing, 2018, 82: 43-53.
- [6] 周占伟. 时间调制天线阵列的设计与实验研究[D]. 成都:电子科技大学, 2007.
- [7] 曹岸杰,贺冲,梁仙灵,等. 一种用于双通道跳频技术的时间调制阵列系统[J]. 电波科学学报, 2014, 29(6): 1076-1080, 1121.
- [8] 曹岸杰. 基于时间调制阵列的抗多普勒和跳频技术研究[D]. 上海:上海交通大学, 2014.
- [9] 贺冲. 时间调制阵列理论与应用研究[D]. 上海:上海交通大学, 2015.
- [10] 高飞,黄博. 基于谐波分析的两阵元时间调制阵列测向方法[J]. 电子科技, 2015, 28(12): 158-160, 172.
- [11] 蔡得泉. 基于时间调制的阵列天线旁瓣抑制技术研究[D]. 成都:电子科技大学, 2016.
- [12] 姚阿敏. 时间调制阵列天线的研究[D]. 南京:南京理工大学, 2017.
- [13] 王继学. 星载合成孔径雷达天线的现状与发展[J]. 上海航天, 2001, 18(6): 50-57.

(本文编辑:应振华)