

DOI:10.3969/j.issn.1674-7135.2023.01.007

基于分布式星群的全相参雷达 低副瓣波束形成设计方法

李 渝, 吴 涛, 雷红文, 李财品, 段崇棣

(中国空间技术研究院西安分院, 西安 710000)

摘要:不同于地面稀布阵相参阵列雷达, 分布式星群平台具有高速运动特性, 相应地全相参合成效率受限于星间的空时频同步误差、波束指向误差等系统误差约束。提出了一种基于分布式星群的全相参雷达低副瓣波束形成设计方法。首先, 从星群系统规模、星间安全距离、远场条件、探测链路等因素入手推导了有效探测距离区间。接着, 给出了同步误差、波束指向误差以及卫星高速运动特性对全相参合成效率的定量影响评估方法。最后, 利用空时频多维联合方法实现了低副瓣稳健波束形成, 可有效增加无模糊视场范围, 适用于实际星群规模有限的应用场景。仿真结果验证了所提算法的有效性。

关键词:星群; 全相参雷达; 合成效率; 分布式雷达阵列

中图分类号: V443; TN957.52

文献标志码: A

文章编号: 1674-7135(2023)01-0041-07

Low-sidelobe beamforming method of coherent radar based on distributed satellite constellation

LI Yu, WU Tao, LEI Hongwen, LI Caipin, DUAN Chongdi

(China Academy of Space Technology(Xi'an), Xi'an 710000, China)

Abstract: Different from the ground-based coherent radar, space-based radar constellation possesses high-speed motion characteristics, and the corresponding coherent synthesis efficiency is limited by the space-time-frequency synchronization error, beam pointing error and other systematic errors. In this paper, a novel low-sidelobe beamforming method of dynamic coherent radar based on distributed satellite constellation is presented. Firstly, the effective detection range interval is derived from several factors, i. e., the distributed satellite constellation scale, the inter satellite safety distance, the far field boundary condition and the system link. Then, the quantitative evaluation methods for coherent synthesis is discussed in terms of the synchronization error, beam pointing error and high-speed motion characteristics. Finally, the multidimensional joint method is employed to realize robust low sidelobe beamforming, and thus to increase the view field with no ambiguity, which is suitable for the application scenes with limited satellite constellation scale. Simulation results validate the effectiveness of the given theory analysis.

Key words: satellite constellation; coherent radar; synthetic efficiency; distributed radar array

收稿日期: 2022-06-28; 修回日期: 2022-07-22

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(编号: 62107033)

引用格式: 李渝, 吴涛, 雷红文, 等. 基于分布式星群的全相参雷达低副瓣波束形成设计方法[J]. 空间电子技术, 2023, 20(1): 41-47. LI Y, WU T, LEI H W, et al. Low-sidelobe beamforming method of coherent radar based on distributed satellite constellation[J]. Space Electronic Technology, 2023, 20(1): 41-47.

0 引言

随着商业航天的快速发展,卫星平台及载荷的研制逐渐向标准化、模块化、轻量化的低成本发展路线转型,这也加速了低轨天基雷达的快速布局^[1-2],为星群协同探测奠定了基础。然而,星载雷达在时敏目标探测过程中面临探测距离远以及目标散射截面积(radar cross section, RCS)小的问题,导致回波信噪比不足^[3]。分布式全相参雷达由多个可快速部署的雷达单元组成,利用信号级融合使目标所在单元发射信号及接收信号达到同向相加的目的,实现了等效大口径雷达作用距离的功能,为替代传统大型相控阵雷达实现时敏目标探测提供了一种新思路。因此有必要研究分布式星群雷达系统低副瓣波束形成设计方法,提升分布式星群的预警探测能力。

目前,基于分布式星群的全相参雷达低副瓣波束形成设计难点主要集中在两方面,一方面是系统误差对全相参合成效率的影响;另一方面是稳健的低副瓣波束形成方法。对于前者,空军工程大学防空反导学院刘继业等^[4]提出了基于 TWT3S 模型的时间同步方法,该模型借鉴星载高精度时间同步方法,具有工程实现简单、可靠性高的特点,可为分布式相参系统提供 20 ns 的时间同步能力。南京电子技术研究所吴久涛等^[5]针对双基地构型频率不同源引起的相位误差问题,通过移相器对光纤链路进行收发站相位预补偿,可大幅改善双基体制探测系统固有相位误差对目标检测性能。对于静止平台下分布式阵列雷达的频率与相位同步问题,中国电子科技集团公司 38 所方立军等^[6]基于远场全相参探测的约束条件,设计了适用于微波光电低相噪传输的频率源,试验结果表明该频率源在分布式阵列应用中具有良好的远程频率及相位同步性能。针对地基分布式雷达,对比分析了时间同步误差和相位同步误差对基于连续波信号、编码信号以及线性调频信号的相参系统探测性能的作用机制。西安电子科技大学陈金铭等^[7]采用慢时间码分多址波形,分析了时间、空间和相位同步误差对分布式相参雷达合成信号的影响,同时结合场景特点完成了机载动平台下相参雷达系统同步误差的校正。对于后者,中国电子科技集团公司第 54 研究所李志刚等^[8]提出了一种基于同心圆构型的分布式波束形成方法,通过分析圆环半径取值对低副瓣电平设计的影响,使用最小化峰值旁瓣电平作为目标函数进行全局优化,最高旁瓣电平可抑制到 -17 dB 以

下。南京航空航天大学曹爱华等^[9]结合粒子群全局优化算法和二阶锥规划局部优化算法,以阵元位置和权值作为自由度实现了搜索空域的栅瓣稳健抑制。西安电子科技大学常峻青等^[10]利用发射方向图零限展宽技术,实现分布式 MIMO 雷达接收栅瓣的抑制,为 MIMO 雷达高分辨无栅瓣设计提供了一条有效途径。为了实现三级地区冰盖地形的广域探测,钱学森实验室肖鹏等^[11]提出了星群立体观测系统,利用卫星编队一发多收体制沿航向形成长基线实现杂波抑制及高分辨能力,具备数公里深度冰层的三维成像能力。美国阿拉巴马大学电气与计算机工程系 Prasad Gogineni 等^[12]提出了一项 CubeSat 卫星任务,计划使用 50 颗小卫星沿航向排布形成窄波束并获得精细化分辨能力,通过轨道偏置实现交轨方向的杂波抑制,该方案有效弥补了现有机载冰雷达系统对南极冰层覆盖能力的不足。可以看出,已有研究罕有涉及分布式星群高速运动平台全相参系统合成效率对应非理想因素指标分解方法,以及星群安全间距、远场约束等条件下的多维度低副瓣波束形成方法,需要结合星群的特点对全相参动态阵列雷达进行方案设计及性能评估。

文章提出了一种基于分布式星群的全相参雷达低副瓣波束形成设计方法。一方面,基于全相参远场约束条件和探测链路约束条件,给出了系统同步误差、波束指向误差以及卫星高速运动特性对全相参合成效率的定量影响评估方法。另一方面,利用空时频多维联合方法进行低副瓣稳健波束形成,可在有限空域自由度条件下增加无模糊视场范围,为分布式星群全相参探测提供了一种高效途径。

1 分布式星群全相参探测模型

分布式阵列方向图的数学表达式如式(1)所示:

$$F(\theta, \varphi) = F_e(\theta, \varphi) \sum_{n=0}^{N-1} \exp\left(\frac{j2\pi}{\lambda} \Delta R_n\right) \quad (1)$$

其中 θ, φ 分别代表方位角和俯仰角, $F_e(\theta, \varphi)$ 为每个雷达的子阵方向图, N 为分布式卫星数目, ΔR_n 为星间波程差。

全相参探测^[13]过程中,阵列流形的全场模型可表示为^[14]:

$$w = \left[1e^{\frac{j2\pi d(\sqrt{R^2+d^2}-2Rd\cos\theta-R)}{\lambda}} \dots e^{\frac{j2\pi Nd(\sqrt{R^2+(Nd)^2}-2RNd\cos\theta-R)}{\lambda}} \right] \quad (2)$$

其中 d 代表相邻子阵间距, R 代表目标距离天线中心的探测距离, θ 为扫描角度。

全场模型的一阶远场近似模型可表示为:

$$w = [1e^{-\frac{j2\pi d \cos \theta}{\lambda}} \dots e^{-\frac{j2\pi N d \cos \theta}{\lambda}}] \quad (3)$$

可以看出,根据卫星探测目标距离区间的不同,一般将探测空间分为近场和远场。考虑到分布式全相参阵列近场网格搜索资源调度困难,需要距离和角度联合扫描,即单个波束内不同距离单元的空域导向矢量具有空变性,难以满足实时性检测要求。而目标位于远场时,单个波束内不同距离单元的空域导向矢量可认为是近似相同的,只需要进行角度扫描。因此,分布式星群大范围搜索过程中一般采用远场工作模式完成目标的探测。

2 基于分布式星群的全相参雷达低副瓣波束形成设计方法

本文算法提供了一种基于分布式星群的全相参雷达低副瓣波束形成设计方法,解决空天时敏目标的可靠检测问题,其主要步骤如下:

步骤 1 分布式星群探测距离区间设计。

为了兼顾分布式星群动态阵列雷达二维波束扫描能力,星群的构型采用二维方阵稀疏优化排布。

(1) 全相参探测远场区域约束条件

分布式星群动态阵列雷达搜索区域需要处于远场,以满足时敏目标实时检测需求,远场约束条件为目标探测距离 R 需大于 $\frac{2D^2}{\lambda}$,其中 D 代表阵列

孔径,信号波长 $\lambda = \frac{c}{f_0}$, c 为光速, f_0 为信号载频。

(2) 全相参探测链路约束条件

假设目标最小可检测信噪比为 $(S/N)_0$,分布式星群最大探测距离为 $R_{\max}$,根据雷达方程,全相参探测链路满足:

$$R_{\max}^4 = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma M}{(4\pi)^3 k T_0 F B (S/N)_0 L_s} \quad (4)$$

其中, P_t 为发射峰值功率, G 为天线增益, σ 为目标散射截面积, k 为波尔兹曼常数, T_0 为噪声温度, F 为噪声系数, B 为接收机带宽, L_s 为系统损耗,信号处理增益 M 。

$$M = \tau B N_{\text{chirp}} \frac{(CN)^4}{N} \quad (5)$$

式(5)中, τ 代表信号脉宽, N_{chirp} 为单个相参周期内的积累脉冲数, C 代表全相参合成效率。

因此,结合全相参远场区域约束条件和全相参探测链路约束条件,目标探测距离需满足:

$$\frac{2D^2}{\lambda} < R < R_{\max} \quad (6)$$

步骤 2 分布式星群全相参合成效率分析。

对于分布式动态阵列雷达,全相参合成效率主要受到系统同步误差、波束指向误差、卫星高速运动特性等因素的影响,下面对其展开定量评估。

(1) 系统同步误差对全相参合成效率的影响

雷达系统总体相位误差的标准差如式(7)所示:

$$\xi = \sqrt{\xi_t^2 + \xi_f^2 + \xi_p^2 + \xi_\psi^2} \quad (7)$$

其中 $\xi_t^2, \xi_f^2, \xi_p^2, \xi_\psi^2$ 分别为时间同步误差 Δt 、频率同步误差 Δf 、第 i 个阵元位置误差 (x_i, y_i, z_i) 以及射频通道误差引起的相位误差。

系统同步误差服从正态分布,则卫星存在系统同步误差情况下的合成效率为:

$$P_1 = \text{abs}(\text{sum}(\exp(1j * \text{normrnd}(0, \xi), 1, M))) \quad (8)$$

其中 abs 代表取绝对值操作, sum 代表求和操作, $\exp$ 为指数运算, $\text{normrnd}(0, \xi)$ 代表生成均值为 0, 标准差 ξ 为的随机数, j 为虚部, M 为每个小卫星天线阵元个数。

(2) 波束指向误差对全相参合成效率的影响

假设每个卫星的波束指向误差为主瓣宽度 $\theta_{3\text{dB}}$ 的 T 倍,则卫星存在波束指向误差情况下的合成效率为:

$$P_2 = \left| \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2}(M-1)\sin\left(\frac{2T}{M-1}\right)\right)}{\frac{\pi}{2}(M-1)\sin\left(\frac{2T}{M-1}\right)} \right| \quad (9)$$

(3) 卫星高速运动对全相参合成效率的影响

假设单个脉冲相参累积间隔为 CPI , CPI 内卫星高速运动引起的目标最大角度偏移为 $\Delta\theta$ 。

假设归一化天线方向图为 $F(\theta)$,波束中心指向为 θ_0 ,则卫星高速运动条件下全相参合成效率为:

$$P_3 = \frac{F(\theta_0 + \Delta\theta)}{F(\theta_0)} \quad (10)$$

综上,全相参工作模式下分布式星群总的合成效率可表示为:

$$P = 1 - [(1 - P_1) + (1 - P_2) + (1 - P_3)] \quad (11)$$

步骤 3 分布式星群空时频三维低副瓣波束形成。

分布式星群全相参探测要求目标处于远场,因此星群规模受限,有限的阵列自由度无法在空域进行低副瓣稳健波束形成。为了更有效地抑制栅瓣并压低旁瓣,可以采用有限空域自由度 + 多载频 + 时域虚拟阵元的空时频多维联合方法进行低副瓣波束形成,增加无模糊视场范围。本文压低栅瓣和副瓣的算法主要思想为:1)利用雷达阵列运动特性在不同 CPI 形成虚拟孔径,增加空域自由度。2)在频率维度上引入了

多个频点自由度,进一步提升系统自由度。3)采用阵列非均匀排布优化算法,在满足卫星安全间距的条件下进一步降低系统栅瓣和副瓣。一方面,分布式星群在目标探测过程中一个 CPI 较短,因此可以利用卫星在时域上的运动特性形成虚拟孔径,弥补卫星间距之间的空域自由度空白。另一方面,在空时联合阵列波束形成的基础上,引入多载频方法,即采用多个发射频点,通过多频波束图取模相乘达到去栅瓣及压低旁瓣的效果。

对于所提方法,分布式星群中的每个卫星同步按相同脉冲重复间隔依次发送 K 个频点的脉冲信号,每个脉冲信号的频点不同;获得每个频点对应的方向图函数,对每个频点对应的方向图函数进行取模相乘处

理,获得多频方向图函数 $F_i(\theta) = \sqrt{\prod_{j=1}^K F_j(\theta)}$;脉冲重复间隔等于单个脉冲相参累积间隔 CPI ;随分布式星群飞行位置的改变,在每个飞行位置分别重复上述步骤,获得 L 个位置对应的多频方向图函数,对 L 个位置对应的多频方向图函数进行取模相乘处理,获得

合成方向图函数 $F(\theta) = \sqrt{\prod_{i=1}^L F_i(\theta)}$,即可实现空时频三维低副瓣波束形成。该方法给出了同步误差、波束指向误差以及卫星高速运动特性对全相参合成效率的定量影响评估方法。利用空时频多维联合方法实现了低副瓣稳健波束形成,可有效增加无模糊视场范围,适用于有限星群规模的雷达探测应用场景。

图 1 给出了基于分布式星群的全相参雷达低副瓣波束形成设计方法流程图。

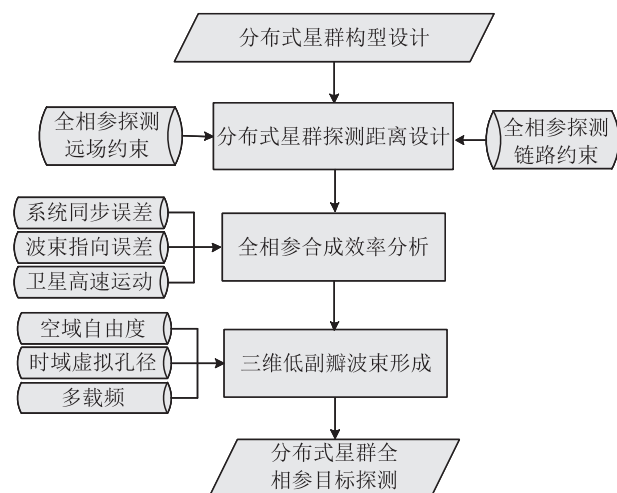


图 1 基于分布式星群的全相参雷达低副瓣波束形成设计方法流程图

Fig. 1 Flowchart of low-sidelobe beamforming method of coherent radar based on distributed satellite constellation

3 仿真结果

假设星群构型采用 6×6 方阵,为了最大程度降低栅瓣对低副瓣波束形成的影响,星群间距设置尽量小;同时为了保证星间安全距离,卫星间距设置为 50 m,如图 2 所示。分布式雷达的基线是通过非均匀布阵优化出来的,优化前后星群构型排布如图 3 所示。优化算法卫星相邻基线初始值为 50 m,优化目标函数为最小第一副瓣。单个卫星天线尺寸为 5 m,卫星的波束指向误差为主瓣宽度的 0.01 倍,卫星运行高度 500 km,单个脉冲相参累积间隔为 CPI 为 8.4 ms,目标探测距离为 800 km,雷达信号载频为 1.25 GHz,信号带宽 1 MHz。单颗卫星雷达发射峰值功率 5 kw,对应占空比 10%。天线增益 34.18 dB,分布式星群对空间区域进行探测,目标为具有较小 RCS 的时敏目标(仿真中散射截面设置为 0.03 m^2),噪声系数 2 dB,接收机带宽为 10 MHz,系统损耗 10 dB,信号处理增益 86.9 dB。

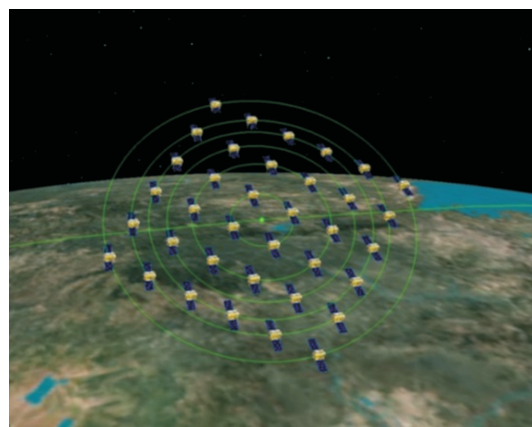


图 2 基于 STK 软件的星群构型图

Fig. 2 Satellite constellation configuration based on STK

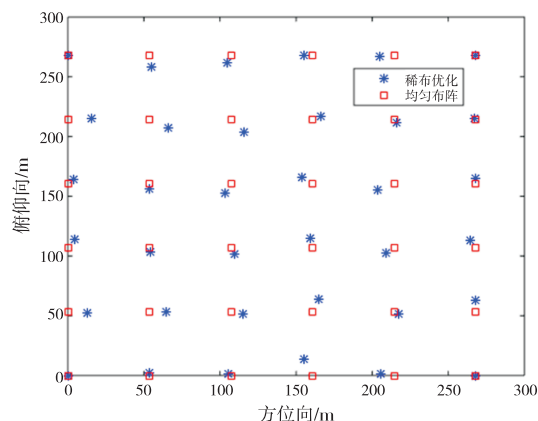
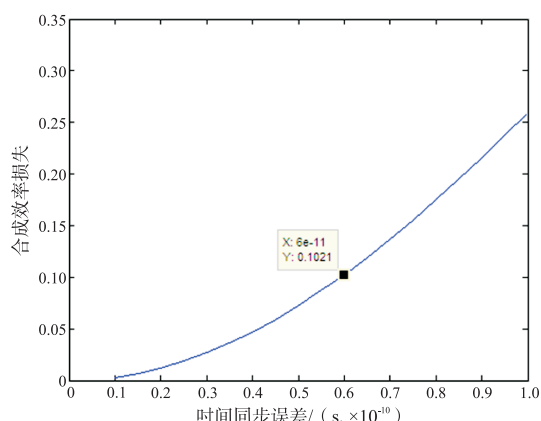


图 3 优化前后的星群构型图

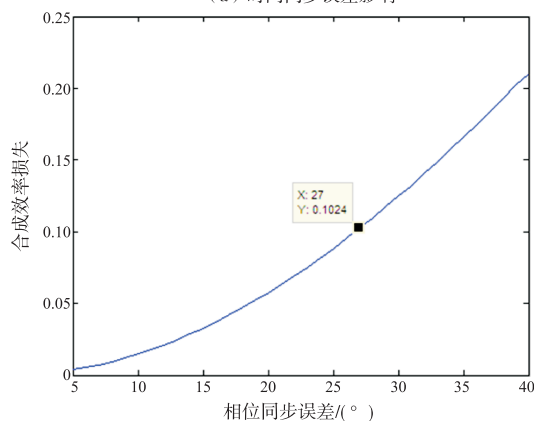
Fig. 3 Satellite constellation before and after antenna array optimization

基于全相参远场约束条件和探测链路约束条件,可以得到探测区间的最小距离为 600 km,最大距离为 1 000 km。

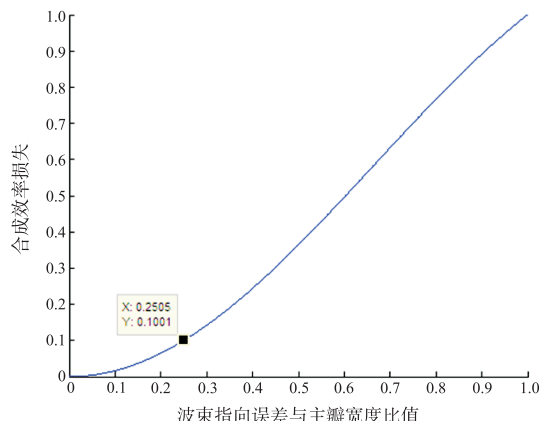
按照星群系统全相参合成效率 90% 约束条件,时间同步误差、相位同步误差、空间波束指向误差和平台高速运动引起误差对应边界条件如图 4 所示,要求分布式雷达系统时间同步精度优于 60 ps,相位同步误差优于 27° ,波束指向误差与主瓣波束宽度比小于 0.25,卫星和目标的相对切向速度 23 700 m/s,该边界值为全相参系统同步、波束指向等指标设计提供了参考依据。



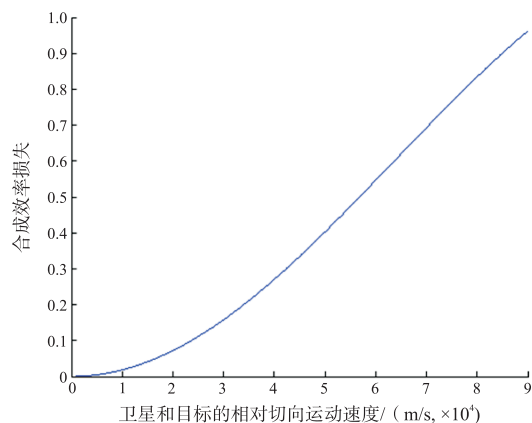
(a) 时间同步误差影响



(b) 相位同步误差影响



(c) 波束指向误差影响



(d) 卫星高度运动特性的影响

图 4 不同非理想因素下的合成效率

Fig. 4 Synthetic efficiency with different non-ideal factors

令系统同步误差设置为时间同步精度 48 ps,通道相位误差为 5° ,阵元位置定位误差 5 mm,相对频率稳定度为 10^{-12} ,可以计算得到由系统同步误差引起的合成效率损失为 7.74%,波束指向误差引起的合成效率损失为 0.02%,卫星高速运动引起的合成效率损失为 1.69%,最终的星群全相参合成效率优于 90%。

基于上述卫星构型,利用卫星在时域上的旋转特性形成虚拟孔径,弥补 50 m 阵元间距之间的空白,进一步抑制栅瓣并压低副瓣。

文章采用的三维低副瓣波束形成中,在卫星安全间距 50 m,目标探测距离 600 km 以上的约束条件下,以最小化第一副瓣为目标函数,经过遗传算法优化^[15],10 个频点分别为 1.000 0 GHz、1.078 2 GHz、1.123 3 GHz、1.186 9 GHz、1.250 0 GHz、1.585 3 GHz、1.649 1 GHz、1.678 7 GHz、1.796 2 GHz 和 1.817 6 GHz。图 6 为波束中心俯仰角、方位角均指向 90° 时的波束图,若使用单频实现阵列波束形成,第一副瓣仅为 -2 dB 左右,无法满足工程应用。空频联合算法利用空域和频域自由度可有效压低副瓣电平,副瓣优于 -11 dB。本文提出的空时频联合优化策略,对应星群俯仰/方位维的最大副瓣均优于 -14 dB,可进一步提升低副瓣波束形成算法性能,验证了所提算法理论分析的有效性。从统计的角度可知,若目标速度大小为 5 km/s,空天时敏目标相对星群概率具有一定的径向速度,因此在多普勒域与目标竞争的杂波一般位于偏离波束中心指向 5° 以外的空域,相应的星群波束图二维副瓣电平平均优于 -30 dB,满足微弱目标的探测要求。

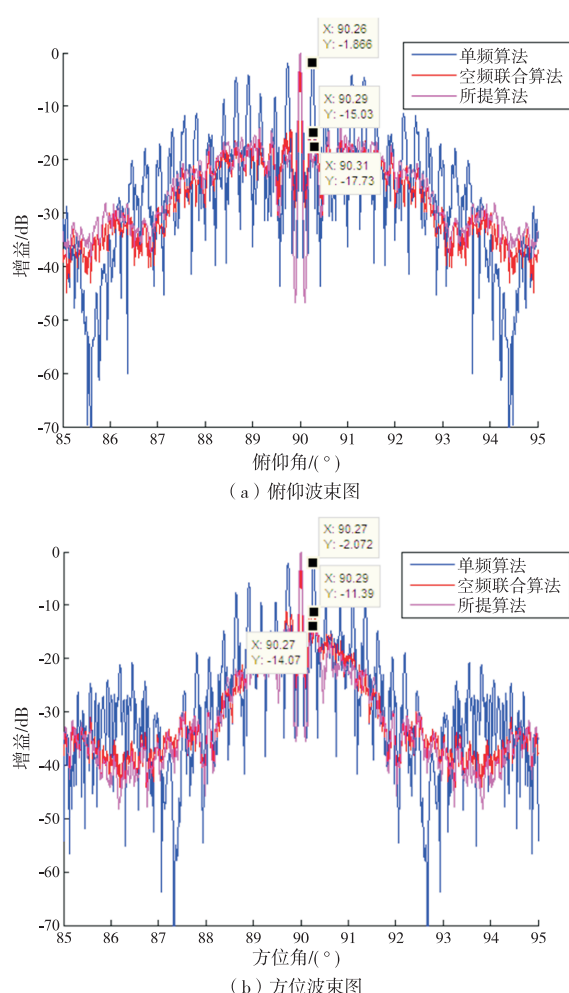


图 5 90°俯仰角,90°方位角波束指向下的波束图

Fig. 5 Beam patterns under the beam pointing direction of 90° azimuth angle and 90°pitch angle

仿真结果表明,对于有限空域自由度的分布式星群,利用本文空域、时域、频域多维度优化方法,在满足 90% 全相参合成效率前提下,可实现星群动态阵列的低副瓣波束形成,满足实际雷达系统探测需求。

4 结论

现有的分布式相参研究主要集中在地面稀布阵应用领域,并没有报道针对星群平台的分布式相参系统相关研究。所提分布式全相参雷达低副瓣波束形成设计方法结合分布式星群的运动特点和系统探测约束条件,从全相参合成效率的定量评估手段以及低副瓣稳健波束形成方法入手,提供了一种适用于高速运动星群平台的全相参探测新思路。该方法同样适用于无人机群等其他运动平台全相参探测领域,应用前景广阔。

参考文献:

- [1] TREGLOAN-REED J, OTAROLA A, UNDA-SANZANA E, et al. Optical-to-NIR magnitude measurements of the Starlink LEO Darksat satellite and effectiveness of the darkening treatment [J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2021, 647: A54.
- [2] 夏方园,陈祥,陈安和,等. 星载小型化激光通信终端技术研究现状及发展方向综述[J]. *空间电子技术*, 2020, 17(3): 73-80.
- [3] LI Y, LI C P, TIAN M, et al. Two-step thresholds TBD algorithm for time sensitive target based on dynamic programming [J]. *IEEE Access*, 2020, 32(8): 209267-209277.
- [4] 刘继业,陈西宏,刘强,等. 一种双基地雷达时间同步的新方法[J]. *电光与控制*, 2014, 21(4): 10-14.
- [5] 吴久涛,曹欣荣,陈亚伟. 一种用于双基地雷达的光纤相位同步技术[J]. *现代雷达*, 2018, 40(2): 12-16 + 23.
- [6] FANG L, MA J, LIU Y. Frequency and phase synchronization of a large distributed array radar [J]. *Modern radar*, 2017, 39(1): 12-19.
- [7] 陈金铭,王彤,吴建新,等. 基于特显点的机载分布式相参雷达同步误差校正方法[J]. *电子与信息学报*, 2021, 43(2): 356-363.
- [8] LI Z, WANG P. Grid lobe suppression of large spacing subarray based on concentric ring [J]. *Journal of Radio Science*, 2016, 31(6): 6.
- [9] Cao Aihua. Grating lobe suppression of airborne opportunistic array based on second-order cone programming and intelligent algorithm [D]. Xi'an: Xidian University, 2017.
- [11] XIAO P, GUO W, LIU B, et al. Aspacebornmultistatic radar sounding system for the tomographic observation of polar ice sheets [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2022, 19(1): 1-5.
- [12] GOGINENI P, SIMPSON C R, YAN J B, et al. ACubeSat train for radar sounding and imaging of Antarctic ice sheet [C]//IGARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2018: 4138-4141.
- [13] CHEN J M, WANG T, WU J X, et al. Airborne distributed coherent aperture radar synchronization error calibration method based on prominent points [J]. *Journal of Electronic & Information*, 2021, 43(2): 356-363.

- [14] WANG C Y, FU F Z, LI Y L, et al. Detecting solder balls in full-field ball grid array images using a coarse-to-fine process[C]//Proc SPIE 10827, Sixth International Conference on Optical and Photonic Engineering (IcOPEN 2018), 2018:272-277.
- [15] KIM C, BATRA R, CHEN L. Polymer design using genetic algorithm and machine learning[J]. Computational Materials Science, 2021, 18(6):110067.

作者简介:李渝(1988—),河南南阳人,博士,高工。主持国家自然科学基金青年项目 1 项,先后承担了集团/五院重大自主研发、军委科技委创新特区、173 领域基金、军科委火花课题等多个项目。发表 SCI 和 EI 检索文章 15 篇,已授权发明专利 20 项。主要研究方向为天基雷达微弱目标检测。E-mail:405416718@qq.com

通讯作者:段崇棣(1972—),陕西西安人,硕士,研究员。中国航天基金奖获得者、国家高分辨率对地观测系统重大专项专家组专家、国家科技部、战略支援部队评审专家、航天科技集团有限公司微波遥感领域学术技术带头人,先后主持了多项国家重大项目技术攻关,获得省部级以上科技成果奖四项、专利奖一项,主要研究方向为雷达系统设计。E-mail:duand@cast504.com