

文章编号: 2095-4980(2019)01-0040-06

多区域多维覆盖联合优化卫星任务规划

李耀东, 张 静, 江建军

(信息工程大学 信息工程学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 针对电子侦察卫星如何对多目标潜在区域进行普察的任务规划问题, 通过分析电子侦察卫星的应用场景、任务需求及执行约束, 将待观测区域网格化、观测时间离散化以及对观测频率频段化处理, 建立解决该问题的时空频三维覆盖优化模型。通过改进编码结构、初始化以及对约束处理等方法, 将遗传算法用于该模型的求解。仿真实验表明, 改进的算法可以适应多卫星长编码多约束优化问题求解, 模型可以优化任务规划结果。

关键词: 卫星; 任务规划; 离散化; 矩阵循环移位初始化; 遗传算法

中图分类号: TN92

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201901.0040

Mission scheduling of electronic reconnaissance satellites based on multi-area

LI Yaodong, ZHANG Jing, JIANG Jianjun

(Institute of Information System Engineering, University of Information Engineering, Zhengzhou Henan 450001, China)

Abstract: Regarding to the issue of how Electronic Reconnaissance Satellites(ERS) execute the regional survey mission task, the optimization model considering time, area and frequency are established by analyzing the application scenes, task requirements and the constrained conditions of ERS, through dividing the observation area into grids, the discretization of the observatory time, and the processing on the observatory frequency. The genetic algorithm could apply to the model by modifying the structure of code, initializing the method and introducing the penalty function. Conclusion of the simulation indicates that the ERS area census task could be effectively executed with the proposed model and algorithm.

Keywords: satellite; mission scheduling; discretization; matrix circular shift initialization; genetic algorithm

对地观测卫星利用卫星传感器获取地球表面和低层大气的有关信息, 具有覆盖范围广、不受空域国界限制、不涉及人员安全等特点, 广泛用于测绘、农业、天气灾害监测和基础设施建设等领域, 在军事领域更是得到广泛应用^[1]。现阶段, 在轨工作卫星数量越来越多, 需要卫星完成的观测任务也大量上升, 因此如何有效规划多颗卫星对目标潜在区域进行协同观测以发现目标, 已成为卫星应用领域急需解决的问题。

由于电子侦察卫星的协同观测技术具有保密性, 相关资料难以获取, 公开资料多为成像卫星任务规划。鉴于成像卫星可以看成一类特殊的电子侦察卫星, 其研究具有一定借鉴意义。国外具有代表性的面向区域目标卫星任务规划的研究, 有美国麻省理工大学的 Walton^[2]、美国 NASA 喷气推进实验室的 Cohen^[3]、法国欧空局的 Lemaître^[4]和澳大利亚的 Rivett^[5]等, 他们分别针对不同卫星体系的任务规划问题进行研究。国内邱涤珊等^[6]讨论了电子侦察卫星的区域普查问题, 将多星观测分析转化为卫星过顶次数观测, 分配给不同卫星过顶过程不同观测频段, 并采用改进遗传算法求解。上述研究主要是面向单个区域目标的单星任务规划或面向多个区域目标的多星任务规划, 仅考虑卫星单次过顶覆盖因素, 未涉及时域、空域的联合优化。

本文将对电子侦察卫星区域普察任务规划问题进行研究, 以满足时域、空域、频域三维联合覆盖最优化的区域普察要求。针对电子侦察卫星如何对多目标潜在区域进行普察的任务规划问题, 分别从模型建立、改进求解算法等方面进行研究, 最终使得时域、空域及频域三维空间观测覆盖最优。

1 离散化处理

由于卫星区域普察任务所涉及的时间、空间、频率 3 个属性均为连续属性，为降低复杂度且更易于统计，本文对观测过程中涉及的三维连续属性进行离散化处理。

1.1 待观测区域离散化处理

对待观测区域(AREA)进行网格化处理。借鉴 Lemaître M 等^[5]与 Ruan 等^[7]对于不规则区域的处理方式，将不规则待观测区域进行网格化处理。处理方式是先将不规则待观测区域划分为一个便于处理的网格空间，经过投影变换，由该区域边界定点在高斯直角坐标系中的最小水平坐标 $\alpha_{i\min}$ 、最大水平坐标 $\alpha_{i\max}$ 、最小垂直坐标 $\beta_{i\min}$ 和最大垂直坐标 $\beta_{i\max}$ 定义一个矩形区域，并将其按照适当距离长度等分成连续相邻的正方形网格。其中水平、垂直网格数目分别为 H 和 V ，记为 $area_i^{ab}$ ：

$$area_i^{ab} = \left[\alpha_{i\min} + \frac{a(\alpha_{i\max} - \alpha_{i\min})}{H}, \beta_{i\min} + \frac{b(\beta_{i\max} - \beta_{i\min})}{V} \right] \quad (1)$$

式中 a 和 b 用于 $area_i$ 待观测区域位置区分，则区域目标 AREA 为：

$$AREA = \sum_{j=1}^{N_o} area_j = \sum_{j=1}^{N_o} \sum_{a=1}^{H_j} \sum_{b=1}^{V_j} area_j^{ab} \quad (2)$$

注：网格行为(被观测)使用网格中心点行为(被观察)代替。

1.2 观测行为时间离散化处理

借鉴通信网中对于减轻任务冲突、增加系统吞吐量的方式，将观测的连续时间进行时隙划分，即在规划时间 (TIME) 内：

$$TIME = t_1 + t_2 + \cdots + t_k + \cdots + t_{N_t} \quad (3)$$

式中 N_t 为时隙总数。

在电子侦察卫星的区域普察任务规划中，将连续的时间属性进行离散化处理，带来 3 个优势：

- 1) 容易对任务规划优化目标的适应度函数进行度量；
- 2) 可以充分利用卫星单次过顶时间，对多个区域进行观测，避免针对单个任务的过度观测；
- 3) 将运动的卫星在任意时隙内看作静止，避免由于卫星运动引起的问题。

1.3 观测行为频率离散化处理

卫星载荷均为全频段载荷，但在实际使用中，全频段观测会造成信噪比降低，难以达到观测目的，故常采用特定频段观测。为使在轨卫星频段使用更加高效合理，对其进行频段划分，进而规划使用。

根据在轨卫星载荷观测能力，对其进行频段划分：

$$FREQUENCY = f_1 + f_2 + \cdots + f_m + \cdots + f_{N_f} \quad (4)$$

式中 N_f 为频段总数。

1.4 观测行为定义及离散化处理

针对卫星观测活动，定义行为集合 ACT ： $ACT = \{act_{11}, act_{12}, \cdots, act_{ij}, \cdots, act_{N_s N_o}\}$ ，其中 $act_{ij} = \{act_{ij}^{1,1,1}, act_{ij}^{1,1,2}, \cdots, act_{ij}^{t_k, ab, f_m}, \cdots, act_{ij}^{t_{N_t}, ab, f_{N_f}}\}$ 表示卫星 sat_i 对区域 $area_j$ 的观测行为。对 $\forall act_{ij}^{t_k, ab, f_m} \in ACT$ ， $act_{ij}^{t_k, ab, f_m}$ 均为三维向量，包含时间、空间、频率 3 个分量。如，若卫星 sat_i 对 $area_j$ 中网格化 $area_j^{ab}$ 区域在 t_k 时隙，以 f_m 频段进行观测，则 $act_{ij}^{t_k, ab, f_m}$ 值为 1，否则为 0，表示为：

$$act_{ij}^{t_k, ab, f_m} = (t_k, area_j^{ab}, f_m) = \begin{cases} 1, & \text{对区域目标有观测行为} \\ 0, & \text{对区域目标没有观测行为} \end{cases} \quad (5)$$

2 考虑的主要约束条件

- 1) 可见时间窗约束。地面目标必须对卫星载荷可见，表示为：

$$\begin{cases} ATW_{ij} = \{t \mid act_{ij}^t = 1\} \\ \forall i = 1, 2, \dots, N_s, \forall j = 1, 2, \dots, N_o : t \in ATW_{ij} \end{cases} \quad (6)$$

2) 单颗卫星开机次数约束。\$Nse_m\$ 为规划中 \$sat_i\$ 的第 \$n\$ 个轨道圈次工作过程中的开关机次数：

$$\forall i = 1, 2, \dots, N_s, \forall n : Nse_{in} \leq Cse_{in} \quad (7)$$

3) 单颗卫星开机总时长约束。\$SWT_{in}\$ 为规划中 \$sat_i\$ 的第 \$n\$ 个轨道圈次工作过程中的工作总时长，则：

$$\begin{cases} SWT_{in} = \sum_{k=1}^{N_n} act_{in}^{t_k} \\ \forall i = 1, 2, \dots, N_s, \forall n : SWT_{in} \leq Cwt_{in} \end{cases} \quad (8)$$

4) 单颗卫星工作频段数约束。\$SWF_{ikf}\$ 为卫星 \$sat_i\$ 在 \$t_k\$ 时隙内，最大工作频段数，则：

$$\forall i = 1, 2, \dots, N_s, \forall k = 1, 2, \dots, N_t : SWF_{ikf} \leq Cwf_{ikf} \quad (9)$$

注：约束中为简化约束，若对下标未做限定，则作用域为前文有效取值范围。

3 优化目标

本文任务规划目标从时空频三维覆盖最大化与联合覆盖均衡化 2 个角度来确定。

子目标 1：时空频联合观测覆盖最大化。为保证多颗卫星对目标潜在区域的长时间、大范围、多频段观测，本文建立了时域、空域、频域联合观测覆盖最大化的优化目标。

$$COV_{\max} = \sum_{i=1}^{N_s} \sum_{j=1}^{N_o} \sum_{f=1}^{f_{N_f}} \sum_{t=1}^{t_{N_t}} \sum_{a=1, b=1}^{ab} act_{ij}^{t, ab, f} \quad (10)$$

为多目标优化时方便处理，将联合观测覆盖最大化转化为最小未观测覆盖率，即：

$$F_1 = \min \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^{N_s} \sum_{j=1}^{N_o} \sum_{f=1}^{f_{N_f}} \sum_{t=1}^{t_{N_t}} \sum_{a=1, b=1}^{ab} act_{ij}^{t, ab, f}}{\sum_{i=1}^{N_s} \sum_{j=1}^{N_o} \sum_{f=1}^{f_{N_f}} \sum_{t=1}^{t_{N_t}} \sum_{a=1, b=1}^{ab} 1} \right) \quad (11)$$

子目标 2：时空频联合观测覆盖均衡化。为保证多颗卫星对多个目标区域均衡观测，使每个待观测区域观测过程均衡且保证每个频段尽量均可观测，故设计时空频联合观测覆盖均衡化优化目标。

$$bal_{\min} = \left[\frac{1}{\sum_{j=1}^{N_o} \sum_{a=1, b=1}^{ab} 1} \sum_{j=1}^{N_o} \sum_{a=1, b=1}^{ab} (act_j^{ab, f})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

式中 \$act_j^{ab, f}\$ 表示 \$area_j^{ab}\$ 网格区域被侦察频段数。

同上文，采用线性函数转换的方法，将联合观测覆盖均衡化也映射到 0~1 之间：

$$F_2 = \frac{bal(i) - bal_{\min}}{bal_{\max} - bal_{\min}} \quad (13)$$

多目标联合优化：卫星区域普察任务规划模型，实际是多目标联合优化问题，本模型 2 个优化目标不存在明显优先关系，故采用线性组合的方法，使多目标优化转换为单目标优化：

$$\begin{cases} F_{\text{uction}} = w_1 F_1 + w_2 F_2 \\ w_1 + w_2 = 1 \end{cases} \quad (14)$$

式中 \$w_1, w_2\$ 为不同优化目标对应权重。

4 求解算法

卫星的任务规划问题属于 NP-hard 问题^[8-10]，目前国内外学者通常采用人工智能的方法对其求解，如蚁群算法、贪婪算法、神经网络算法等。考虑到卫星区域普察任务规划问题搜索空间大的特点，采用遗传算法并改进，对本文抽象出的基于时空频覆盖联合优化的卫星区域普察多约束目标优化模型进行求解。

遗传算法具有良好的全局搜索能力,不会陷入局部的快速下降陷阱,并且可利用它的内在并行性,加快求解速度。本文提出自适应算法,使其具有更快全局收敛速度,适应本文模型求解。

4.1 自适应性矩阵初始化

原始遗传算法中,初始化种群为随机初始化,导致在算法迭代初始化阶段,无效搜索比重巨大,且在进化中存在容易陷入局部最优的问题。借鉴 Muhammad Naeem 等^[11]在无线传感网中自适应循环群落(Cyclical Shifts Population, CSP)初始化思想,本文提出一种矩阵循环初始化方法(Matrix Loop Initialization, MLI)。实现过程: a) 随机产生与模型约束条件相适应的第 1 个时频矩阵(粒子); b) 时频矩阵中每一行根据 CSP 中循环移位的方法产生种群的其他时频矩阵(粒子)。见图 1。

4.2 约束处理方法

本文讨论的电子侦察卫星区域普察任务为多约束优化问题,存在约束检查过程,约束检查的处理直接影响到算法收敛速度。为简化遗传计算中的复杂度,采用罚函数的方法,将约束条件设计成罚函数的方式加入到适应度函数中,把有约束优化问题转化为无约束优化问题,对不满足约束的解,产生惩罚项,从而达到排除不满足约束的效果。

设电子侦察卫星区域普察任务规划的适应度函数为最小未覆盖率与罚函数之和,本文罚函数项共 4 项,分别对应第 3 节所述 4 项约束条件:

$$\begin{cases} \text{Fitness} = w_1 F_1 + w_2 F_2 + \sum_{i=1}^4 \xi_i G_i(x) \\ w_1 + w_2 = 1 \end{cases} \quad (15)$$

5 仿真实验与分析

由于智能算法在求解问题时具有随机性,故本文对实验采用蒙特卡洛方法处理,对每条收敛曲线均采用 10 次计算的均值进行绘制。采用主频为 2.4 GHz 的 PC 机,在 Matlab 环境下对模型及算法进行一系列的仿真。设置地球 2D 地图并加入电子侦察卫星星下点轨迹,对北美、欧洲、印度洋、西太平洋等 4 个区域进行观测。

5.1 算法收敛性随机初始化

以 20 s 为 1 个时隙,区域网格划分力度为经纬度 3°(在地球 2D 示意图中经度、纬度各 3°的正方形网格),进行仿真实验,见图 2 和图 3。

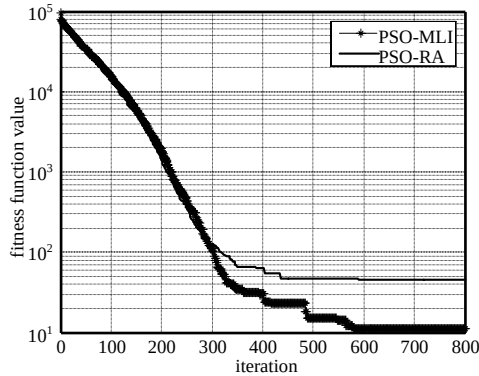


Fig.2 Different Initialization Analysis of PSO convergence
图 2 MLI 初始化方法在粒子群算法中的应用

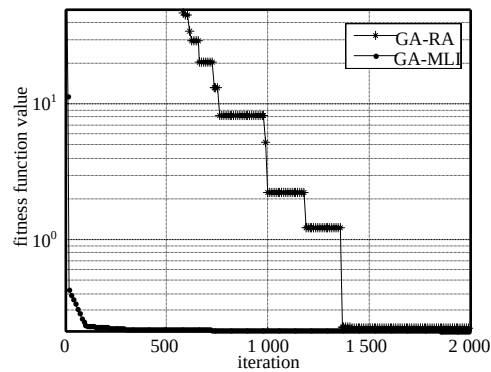


Fig.3 Different initialization analysis of GA convergence
图 3 MLI 初始化方法在遗传算法中的应用

从粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization, PSO)不同初始化方法收敛图可以看出,MLI 初始化方法可以有效避免 PSO 算法陷入局部最优,并且可以优化收敛效果。采用随机初始化方法的遗传算法,迭代次数 670,750,

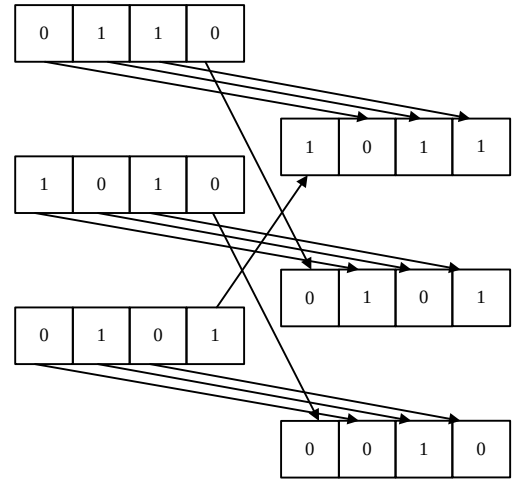


Fig.1 Schematic diagram of MLI
图 1 MLI 初始化原理图

1 000,1 200 分别陷入局部最优,在 1 350 左右才收敛为最优解;而采用 MLI 初始化方法的遗传算法,并未出现局部最优问题,在迭代次数 400 左右收敛,得到最优解。

5.2 时隙划分与规划结果及收敛性关系

网格划分力度为经纬度 3° ,时隙划分分别为 10 s,12 s,15 s,16 s 和 20 s,进行仿真,见图 4 和图 5。分别以 10 s,12 s,15 s,16 s 和 20 s 为一个时隙,可以看出,除 16 s 为一个时隙未在 500 次迭代次数内收敛到可行解范围外,其余不同时隙划分均可以收敛到 0.1 以下,获得满足要求的规划结果。随着时隙划分的增多,寻优空间增大,搜索空间由 5^{360} 降低到 5^{180} ,故收敛速度逐渐降低。

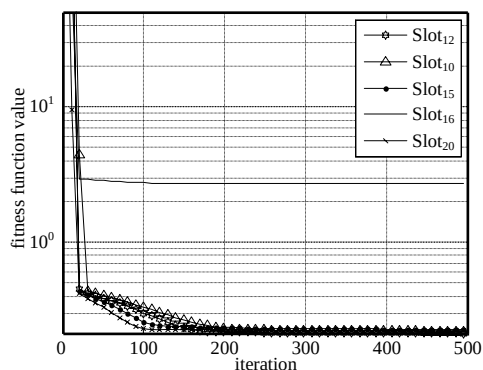


Fig.4 Convergence relation with different slots
图 4 时隙划分与规划结果收敛性关系

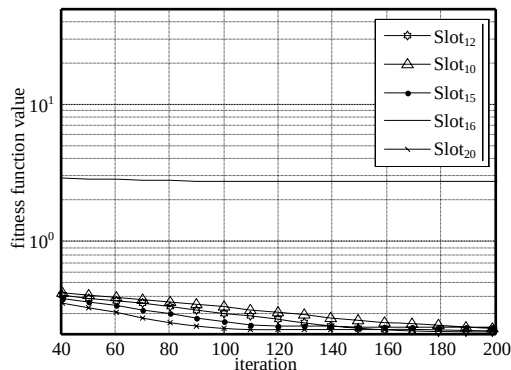


Fig.5 Convergence velocity diagram
图 5 时隙划分与规划结果收敛性关系局部放大

6 结论

本文针对多电子侦察卫星的多区域普查任务规划问题进行了研究,分析其应用场景和任务需求,建立了时域、空域及频域三维联合覆盖优化的观测任务规划优化目标及多约束模型;对传统遗传算法进行改进,并将其应用于模型处理中。通过仿真实验,本文提出矩阵循环移位初始化方法可有效避免遗传算法陷入局部最优的缺陷,并提高收敛速度。对于粒子群算法,矩阵循环移位初始化方法初期对于算法收敛速度提升影响较小,但是迭代后期,能更加有效避免陷入局部最优。通过不同时隙划分实验,分析得到时隙数目的划分影响算法收敛速度,时隙划分越多,收敛速度越慢。本文提出的卫星任务规划研究方法对卫星任务规划研究有一定借鉴价值,其中提出的连续属性离散化处理为后续研究开辟一个新方向。后续在如何找到最优时隙、网格划分尺度,以及如何在获得观测数据之后继续对卫星规划,使其持续优化卫星资源,如何确定目标区域内目标方面进行研究。

参考文献:

- [1] 王钧. 成像卫星综合任务调度模型与优化方法研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2007. (WANG Jun. Research on modeling and optimization techniques in united mission scheduling of imaging satellites[D]. Changsha,China:Graduate School of National University of DefenseTechnology, 2007.)
- [2] WALTON J. Models for the management of satellite-based sensors[D]. Massachusetts:Massachusetts Institute of Technology, 1993.
- [3] COHEN R. Automated spacecraft scheduling—the aster example[R]. Ground System Architectures Workshop, 2002.
- [4] LEMAÎTRE M,VERFAILLIE G. Selecting and scheduling observations of agile satellites[J]. Aerospace Science and Technology, 2002,6(5):367–381.
- [5] RIVETT C,PONTECORVO C. Improving satellite surveillance through optimal assignment of assets(DSTO-TR-1488)[R]. Australian Government Department of Defence, 2004.
- [6] 邱涤珊,王慧林,祝江汉,等. 面向区域普查的电子侦察卫星任务调度[J]. 小型微型计算机系统, 2011,2(2):379–384. (QIU Dishan,WANG Huilin,ZHU Jianghan,et al. Area census-oriented electronic reconnaissance satellites scheduling technique[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2011,2(2):379–384.)
- [7] RUAN Qiming,TAN Yuejin,LI Yongtai. Constraint satisfaction-based multi-satellite observation on area object[J]. Journal of Astronautic, 2007,28(1):238–242.

- [8] BENSANA E,VERFAILLIE G,AGNESE J C,et al. Exact and approximate methods for the daily management of an earth observing satellite[C]// Proceedings of the 4th International Symposium on Space Mission Operations and Ground Data Systems. Munich:[s.n.], 1996:3-12.
- [9] GLOBUS A,LOHN J,CRAWFORD J,et al. Scheduling earth observing fleets using evolutionary algorithms:problem description and approach[C]// Proceedings of International NASA Workshop on Planning & Scheduling for Space. 2003:27-29.
- [10] 卓金武. MATLAB 在数学建模中的应用[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2011. (ZHUO Jinwu. Application of MATLAB in mathematical modeling[M]. Beijing:Beihang University Press, 2011.)
- [11] NAEEM M,PAREEK U,LEE D C. Swarm intelligence for sensor selection problems[J]. IEEE Sensors Journal, 2012, 12(12):2577-2585.

作者简介:



李耀东(1991-), 男, 山东省博兴县人, 在读硕士研究生, 研究方向为多传感器调度, 已发表多篇卫星任务规划研究方面文章 .email: 511242140@qq.com.

江建军(1980-), 男, 四川省渠县人, 在读硕士研究生, 研究方向为人工智能、深度学习、智能算法以及最优化策略.

张 静(1980-), 女, 郑州市人, 博士, 副教授, 主要研究方向是人工智能、深度学习、计算机网络通信以及最优化算法.

2019 年亚洲电磁学国际会议 (Asian Electromagnetics Conference, ASIAEM 2019) 征文通知

9 月 15-20 日, 2019 中国·西安

亚洲电磁学国际会议 (Asian Electromagnetics Conference, ASIAEM 2019) 将于 2019 年 9 月 15 日-20 日在西安召开, 由西安交通大学主办。西安交通大学电气工程学院谢彦召教授担任大会主席, 技术委员会由美国 William Radasky 博士任主席, 中国 E3OE 实验室石立华教授、韩国仁荷大学 Chang-Su Huh 教授任副主席。

ASIAEM 2019 致力于高功率电磁学及相关领域的学者和研究生提供一个学术交流与建立友谊的平台, 分享和了解国际最新科技信息和科研成果, 共同探讨电磁脉冲、窄带和宽带高功率微波、雷电及其防护、基础设施电磁安全、生物电磁效应等相关领域的发展。ASIAEM 2019 会议得到 SUMMA 基金委技术支持。国内多家重点实验室为协办单位或赞助单位。

会议主要议题但不限于:

- 1) Sources, Antennas and Facilities (both wideband and narrowband);
- 2) Applications of Coupling to Structures and Cables;
- 3) Measurement Techniques;
- 4) IEMI Threats, Effects and Protection;
- 5) System-level Protection and Testing;
- 6) Lightning EM Effects;
- 7) Numerical Models and Modeling;
- 8) Bio-effects and Medical Applications of EM Fields;
- 9) Antenna Design, Radiation and Propagation;
- 10) Radar Systems (Signal Processing and Security) Aspects;
- 11) Target Detection, Discrimination and Imaging;
- 12) Landmine and IED Detections;
- 13) Electromagnetic Transients in UHV/EHV Transmission Lines and Substations;
- 14) Design of Protective Devices and Test Methods;
- 15) Evaluation of HEMP/IEMI Impacts on Critical Infrastructure;
- 16) Explosive Devices Effects and Protection for HPEM;
- 17) Statistical Methods in HPEM;
- 18) HPEM Standards.

除了上述主题之外, 目前会议正在征集国内外学者设立 Special Sessions, 鼓励新兴和交叉领域, 截止日期为 2019 年 1 月 31 日。会议论文要求 1-3 页, 截止日期为 2019 年 4 月 10 日。

会议设立杰出青年科学家奖、优秀论文奖和优秀学位论文奖三大奖项。会议同时举办仪器设备展。欢迎参与。

会议网站: <http://www.asiaem.org>

会议邮箱: asiaem2019@xjtu.edu.cn