引文格式:李一,王利,舒宝,等.一种顾及DOP值的ARAIM风险优化分配方法[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(10):2001-2012.DOI:10.13203/j.whugis20230482

Citation:LI Yi,WANG Li,SHU Bao,et al.An Optimal Allocation Method for ARAIM Risk Considering DOP Value[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2025,50(10):2001-2012.DOI:10.13203/j.whugis20230482

一种顾及DOP值的ARAIM风险优化分配方法

李 一[1,2] 王 利[1,2] 舒 宝[1,2] 田云青[1,2] 王冰洁[3] 彭 鑫[4]

1 长安大学地质工程与测绘学院,陕西 西安,710054

2 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室,陕西 西安,710054

3 中电科星河北斗技术(西安)有限公司,陕西 西安,710068

4 61363部队,陕西 西安,710000

摘 要:针对高级接收机自主完好性监测(advanced receiver autonomous integrity monitoring,ARAIM)算法将完好性风险和连续性风险平均分配,导致保护级计算保守的问题,系统分析影响保护级计算的因素,提出了一种顾及精度衰减因子的ARAIM风险优化分配方法,并采用MGEX(multi-GNSS experiment)测站、车载及航空实验3种数据验证该方法的有效性。结果表明,所提方法可实现保护级对定位误差更为紧致的包络,且优于半区间搜索法。相较风险平均方法,3类实验中北斗卫星导航系统(BeiDou satellite navigation system,BDS)保护级的改善率分别为7.5%、11.6%和8.8%。此外,保护级的改善效果与卫星观测几何结构密切相关,不同系统和区域内的优化效果存在差异。对于BDS而言,非亚太地区对应改善幅度优于亚太地区,两区域内的改善幅度分别为3.6 m和1.0 m;在亚太地区,BDS和BDS/GPS组合的改善幅度分别为1.0 m和0.6 m,单BDS提升效果更为显著。

关键词:ARAIM;完好性风险;连续性风险;精度衰减因子;风险优化分配

中图分类号:P228 **文献标识码**:A **收稿日期**:2024-05-19

DOI:10.13203/j.whugis20230482 **文章编号**:1671-8860(2025)10-2001-12

An Optimal Allocation Method for ARAIM Risk Considering DOP Value

LI Yi[1,2] *WANG Li*[1,2] *SHU Bao*[1,2] *TIAN Yunqing*[1,2] *WANG Bingjie*[3] *PENG Xin*[4]

1 College of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China

2 Key Laboratory of Western China's Mineral Resources and Geological Engineering, Ministry of Education, Xi'an 710054, China

3 CETC Xinghe BeiDou Technology (Xi'an) Co. Ltd, Xi'an 710068, China

4 61363 Troops, Xi'an 710000, China

Abstract: **Objectives**: The advanced receiver autonomous integrity monitoring (ARAIM) algorithm equally allocates the integrity and continuity risk, which leads to a conservative protection level calculation. **Methods**: We systematically analyze the factors affecting the protection level calculation, and propose an optimal risk allocation method for ARAIM considering the dilution of precision (DOP), and verifie the effectiveness of the method using three kinds of data from the multi-GNSS experiment (MGEX) station, vehicle and airborne experiments. **Results**: The results show that the proposed method can realize a tighter envelope of the protection level to the position error, and its performance is better than that of the half-interval search method. Compared to the risk-averaged method, the protection level improvement rates of BeiDou satellite navigation system (BDS) in the three types of experiments are 7.5%, 11.6% and 8.8%, respectively. In addition, the protection level optimization effect is closely related to the satellite observation geometry, and the improvement effect varies in different systems and regions. **Conclusions**: For BDS, the improvement in the non-Asia-Pacific region is better than that in the Asia-Pacific region, with 3.6 m and

基金项目:国家自然科学基金(42004024,42127802);中央高校基本科研业务费专项资金(300102263202);陕西省科技创新团队项目(2021TD-51);陕西省地学大数据与地质灾害防控三秦学者创新团队项目(2022)。

第一作者:李一,博士生,主要从事GNSS高精度完好性监测算法研究。liyi1066920299@163.com

通信作者:舒宝,博士,副教授。baos613@163.com

1.0 m respectively in the two regions. In the Asia-Pacific region, the optimization effects in BDS and BDS/GPS are 1.0 m and 0.6 m, respectively, with the single BDS enhancement being more significant.
Key words: ARAIM; integrity risk; continuity risk; dilution of precision; optimal risk allocation

全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)作为国家时空信息的重要基础设施,其定位、导航与定时(positioning navigation and timing, PNT)服务已得到广泛应用,并朝着更加泛在、智能与可信的方向发展[1-2]。然而,由于GNSS固有的脆弱性、差错存在的普遍性、不确定及信号易受遮蔽等不足,PNT服务不可避免地会受到各种信号异常或故障的干扰,导致系统的完好性被破坏,进而威胁人员生命和财产的安全。特别是在民用航空和自动驾驶领域,GNSS完好性监测有着比精度更加重要的意义和研究价值[3]。

完好性监测技术是指当系统定位误差超限或不可用于导航时,系统及时向用户告警的能力。终端完好性监测技术具有不依赖外部信息、响应迅速、自主性强、成本低等特点,逐步受到相关领域的关注和青睐[4]。高级接收机自主完好性监测(advanced receiver autonomous integrity monitoring, ARAIM)作为经典的终端完好性监测手段,旨在实现全球范围内60 m高度的垂直引导(localizer performance with vertical guidance down to 200 feet, LPV-200)进近服务[5]。保护级作为ARAIM算法的核心指标,是根据指定场景的完好性需求信息及用户当前状态计算定位误差的上限,比如在载体周围建立起满足完好性风险的安全界限,旨在反映当前导航解的可信程度[6-7]。鉴于传统多元假设解分离(multiple hypothesis solution separation, MHSS)算法将完好性风险和连续性风险平均给所有可视卫星,导致保护级较为保守,限制ARAIM算法的可用性,难以满足用户对精准可信时空信息的需求。针对ARAIM算法可用性低的问题,部分学者通过多源传感器或星座融合来改善卫星观测几何结构,进而提升ARAIM算法性能[8-10],如文献[11]基于实测数据评估单GPS及其组合系统ARAIM算法所提供服务的可用性,并指出GNSS组合系统显著提升了ARAIM算法的可用性。另有学者通过优化分配完好性和连续性风险来提升ARAIM算法的可用性,主要研究内容有利用拉格朗日函数对完好性风险和连续性风险构造搜索空间,有效提升ARAIM算法的可用性,并指出完好性风险对保护级计算的贡献大于连续性风险[12];在此基础上,文献[13]提出了一种顾及定位精度的完好性风险分配方法,利用高斯牛顿法对由完好性风险和连续性风险组成的约束条件迭代解算,实现保护级的优化计算;文献[14]将不同子集对应的完好性风险和连续性风险视为粒子,并将保护级作为其优化目标;文献[15]将最大值最小化方法应用于完好性风险和连续性风险的优化分配,并设计多种实验场景验证了该方法的有效性。

虽然针对ARAIM风险优化分配问题已开展大量研究工作,但当前完好性风险和连续性风险优化分配方法较为复杂且主要利用多目标优化工具包进行,并没有系统阐述所提方法内部对完好性和连续性风险的优化分配机制。为此,本文考虑到精度衰减因子(dilution of precision, DOP)可反映定位精度[16],且其近似项与完好性风险和连续性风险的乘积作为保护级的重要组成部分,提出了一种顾及DOP值的ARAIM风险优化分配方法。该方法围绕DOP值分析了不同子集所应承担的完好性风险和连续性风险,旨在通过合理分配风险来缓解保护级计算保守的问题,并通过静态、动态和仿真实验来验证所提方法的有效性和适用性。

1 MHSS ARAIM算法

鉴于MHSS ARAIM算法简洁且易于实现,现已被视为ARAIM的基础算法,其主要包括故障模式确定、全集和子集构建、故障检测和保护级计算等功能[17]。

1.1 故障模式确定

完好性支持信息(integrity support message, ISM)是由星座服务商分析星座运行历史的性能,用于表征卫星和星座的先验故障概率及标称偏差[18]。当前,ISM包含的具体参数仍待确定,但主要包含5个参数[19],如表1所示。

鉴于ISM中未指定需监测何种故障事件及其先验概率,ARAIM算法需根据ISM计算所需考虑的故障模式$N_{\max}$。为便于阐述原理及简化计算量,后续实验假设当前历元中仅1颗卫星发生故障。$N_{\max}$的通用计算公式为:

$$N_{\max}=\max\left\{n_f\middle|1-\sum_{i=0}^{n_f}P_{\mathrm{ap},i}\leqslant P_{\mathrm{thres}}\right\} \tag{1}$$

表 1　ISM 参数及其定义

Table 1　ISM Parameters and Its Definitions

参数	定义
$P_{\mathrm{sat},i}$	卫星 i 的先验故障概率
$P_{\mathrm{const},j}$	星座 j 的先验故障概率
$\sigma_{\mathrm{URA},i}$	卫星 i 的轨/钟误差作用于完好性的标准差
$\sigma_{\mathrm{URE},i}$	卫星 i 的轨/钟误差作用于精度的标准差
$b_{\mathrm{nom},i}$	卫星 i 的最大标称测距偏差(无故障情形)

注:URA(user range accuracy)表示用户测距精度;URE(user range error)表示用户测距误差。

式中,n_f 为故障模式计数;$P_{\mathrm{ap},i}$ 为当前故障模式 i 发生的先验概率;P_{thres} 为无须监测的故障模式所对应的概率。

1.2　MHSS ARAIM 观测模型

GNSS 的线性化伪距观测方程为:

$$\boldsymbol{y}=\boldsymbol{G}\boldsymbol{x}+\boldsymbol{\varepsilon} \tag{2}$$

式中,$\boldsymbol{y}$ 为观测向量;$\boldsymbol{G}$ 为观测系数阵;$\boldsymbol{x}$ 为导航解;$\boldsymbol{\varepsilon}$ 为观测噪声。

全体卫星参与计算得到的定位解,记为全集解 $\hat{\boldsymbol{x}}^{(0)}$:

$$\hat{\boldsymbol{x}}^{(0)}=\left(\boldsymbol{G}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}_{\mathrm{URA}}^{(0)}\boldsymbol{G}\right)^{-1}\boldsymbol{G}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}_{\mathrm{URA}}^{(0)}\boldsymbol{y}=\boldsymbol{S}^{(0)}\boldsymbol{y} \tag{3}$$

式中,$\boldsymbol{S}^{(0)}$ 为全集情形对应的映射矩阵,旨在将观测域信息 $\boldsymbol{y}$ 映射至位置域;$\boldsymbol{W}_{\mathrm{URA}}^{(0)}$ 为全集情形下评估完好性指标的权阵,其主对角线元素为各观测量对应的权重,非对角线元素为 0,其中观测 i 的权重 w_i 计算公式为:

$$w_i=1/\left(\sigma_{\mathrm{URA},i}^2+\sigma_{\mathrm{user},i}^2+\sigma_{\mathrm{trop},i}^2\right) \tag{4}$$

式中,$\sigma_{\mathrm{user},i}$ 和 $\sigma_{\mathrm{trop},i}$ 分别为观测 i 的测量噪声和对流层噪声的标准差,其计算方法详见文献[18]。由于 ARAIM 算法采用双频无电离层组合,式(4)不考虑电离层影响。

从全集中隔离第 k 颗卫星计算子集解 $\hat{\boldsymbol{x}}^{(k)}$:

$$\hat{\boldsymbol{x}}^{(k)}=\left(\boldsymbol{G}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}_{\mathrm{URA}}^{(k)}\boldsymbol{G}\right)^{-1}\boldsymbol{G}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}_{\mathrm{URA}}^{(k)}\boldsymbol{y}=\boldsymbol{S}^{(k)}\boldsymbol{y} \tag{5}$$

式中,$\boldsymbol{W}_{\mathrm{URA}}^{(k)}$ 为子集 k 评估完好性的权阵,其与全集 $\boldsymbol{W}_{\mathrm{URA}}^{(0)}$ 区别于主对角线第 k 个元素值为 0;$\boldsymbol{S}^{(k)}$ 为子集 k 对应的映射矩阵。

1.2.1　故障检测

子集 k 对应的故障检验统计量为:

$$\Delta\hat{x}_q^{(k)}=\left|\hat{x}_q^{(k)}-\hat{x}_q^{(0)}\right| \tag{6}$$

式中,下标 q 为方向标识,其值为 1、2 和 3 分别代表向量 $\hat{\boldsymbol{x}}$ 的东、北、天 3 个方向的分量。

对于无故障情形,$\Delta\hat{x}_q^{(k)}$ 服从均值为 0、标准差为 $\sigma_{\mathrm{ss},q}^{(k)}$ 的正态分布。故障检验量、全集和子集解对应的标准差计算方法为:

$$\begin{cases}\sigma_{\mathrm{ss},q}^{(k)}=\sqrt{\sigma_q^{(k)2}-\sigma_q^{(0)2}}\\ \sigma_q^{(*)}=\sqrt{\left(\boldsymbol{G}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}_{\mathrm{URA}}^{(*)}\boldsymbol{G}\right)_q^{-1}}\end{cases} \tag{7}$$

式中,$\sigma_q^{(0)}$ 和 $\sigma_q^{(k)}$ 分别为全集和子集解 q 方向对应的标准差。

子集 k 故障检验量的阈值 $T_q^{(k)}$ 的计算公式为:

$$T_q^{(k)}=K_{\mathrm{fa},q}^{(k)}\sigma_{\mathrm{ss},q}^{(k)} \tag{8}$$

式中,$K_{\mathrm{fa},q}^{(k)}$ 为连续性约束系数,其遵循如下规则:

$$\begin{cases}K_{\mathrm{fa},q}^{(k)}=Q^{-1}\left(P_{\mathrm{fa},q}^{(k)}/2\right)\\ \sum\limits_{k=1}^{N_{\mathrm{set}}}P_{\mathrm{fa},q}^{(k)}=P_{\mathrm{fa},q}\end{cases} \tag{9}$$

式中,Q^{-1} 为标准正态累计分布(cumulative distribution function, CDF)的逆函数,其单调特性为减函数,即 $P_{\mathrm{fa},q}^{(k)}$ 越大,$K_{\mathrm{fa},q}^{(k)}$ 越小;$P_{\mathrm{fa},q}^{(k)}$ 为子集对应连续性风险;N_{set} 为子集数。

传统 MHSS ARAIM 算法为简化保护级计算,采用平均分配完好性和连续性风险的策略,其连续性约束系数 $K_{\mathrm{fa},q}^{(k)}$ 为:

$$K_{\mathrm{fa},q}^{(k)}=Q^{-1}\left(P_{\mathrm{fa},q}/(2N_{\mathrm{set}})\right) \tag{10}$$

对应完好性约束系数 $K_{\mathrm{md},q}^{(k)}$ 为:

$$K_{\mathrm{md},q}^{(k)}=Q^{-1}\left(\frac{P_{\mathrm{HMI}}}{cP_{\mathrm{event}}^{(k)}\left(N_{\mathrm{set}}+1\right)}\right) \tag{11}$$

式中,P_{HMI} 为危险误导信息概率(probability of hazardous misleading information, PHMI),是完好性风险的量化指标;c 记为完好性风险因子,由于全集需考虑误差分布的两个尾部[13],全集对应的值为 2,子集为 1;$P_{\mathrm{event}}^{(k)}$ 是故障事件 k 的先验发生概率,其计算方法详见文献[5]。式(11)与连续性风险分配相近,需遵循如下规则:

$$\begin{cases}K_{\mathrm{md},q}^{(k)}=Q^{-1}\left(\dfrac{P_{\mathrm{HMI},q}^{(k)}}{cP_{\mathrm{event}}^{(k)}}\right)\\ \sum\limits_{k=0}^{N_{\mathrm{set}}}P_{\mathrm{HMI},q}^{(k)}=P_{\mathrm{HMI},q}\end{cases} \tag{12}$$

1.2.2　保护级计算

全集对应的保护级 $V^{(0)}$,其计算公式为:

$$V_q^{(0)}=K_{\mathrm{md},q}^{(0)}\sigma_q^{(0)}+\sum_{i=1}^{N_{\mathrm{set}}}\left|S_{q,i}^{(0)}\right|b_{\mathrm{nom},i} \tag{13}$$

式中,$\left|S_{q,i}^{(0)}\right|$ 用于将观测 i 的标称偏差 $b_{\mathrm{nom},i}$ 最大程度映射至位置域。

子集 k 对应的保护级 $V^{(k)}$,其计算公式为:

$$V_q^{(k)}=T_q^{(k)}+K_{\mathrm{md},q}^{(k)}\sigma_q^{(k)}+\sum_{i=1}^{N_{\mathrm{set}}}\left|S_{q,i}^{(k)}\right|b_{\mathrm{nom},i} \tag{14}$$

MHSS ARAIM 算法的保护级的计算公

式为:

$$V_q=\max\left(V_q^{(0)},V_q^{(k)}\right)\ k=1,2,\cdots,N_{\text{set}} \quad (15)$$

1.3 可用性保证

鉴于LPV-200进近阶段对垂直方向需求强烈[20],后续算例仅围绕垂直维度展开。国际民航组织(international civil aviation organization, ICAO)规定LPV-200进近阶段需满足:

1) 95%置信度的精度小于或等于4 m;

2) 99.999%置信度的有效检验门限小于或等于15 m;

3) 99.999 99%置信度下无故障的垂直定位误差小于或等于10 m;

4) 99.999 99%置信度的垂直告警限值等于35 m。

通常条件4)满足时其余条件常满足[11],后续实验将该条件作为强制条件,即保护级小于告警阈值表明ARAIM算法提供的LPV-200进近服务可用。

2 风险优化分配方法

完好性风险和连续性风险作为评估GNSS应用所需导航性能(required navigation performance, RNP)的两个重要指标,ICAO已将其量化,两者定义分别如下:

1)完好性风险是指定位误差超过告警阈值且未发出警告的概率,可由漏警率和先验故障率描述[21]。

2)连续性风险是指终端在运行过程中检测到未计划的告警(中断)信息的概率,包括正确告警和错误告警的事件。

2.1 保护级影响因素

由式(13)和式(14)可以看出,保护级主要由两类信息构成[22],一种是高斯项V_q^{I},可根据正态分布函数和定位解标准差计算,如$V_q^{\mathrm{I}}=K_q\cdot f(\sigma_q^{(k)})$,式中$K_q$可根据CDF函数、所分配的完好性和连续性风险求解;另一种是偏差包络项V_q^{II},如$V_q^{\mathrm{II}}=\sum_{i=1}^{N_{\text{set}}}\left|S_{q,i}^{(k)}\right|b_{\text{nom},i}$,旨在将观测域中标称偏差$b_{\text{nom}}$最大程度映射至位置域。

当卫星几何构型和ISM信息确定后,V_q^{II}可唯一确定,而V_q^{I}中K_q随着子集对应的完好性风险或连续性风险变化而变化。传统的MHSS ARAIM算法将风险平均分配,然而不同子集所应承担的风险存在差异,平均分配可能会降低ARAIM算法的可用性。因此,评估不同子集对完好性和连续性风险的贡献,并探寻一种风险分配方法从而缓解保护级计算保守的问题具有重要的研究价值。

2.2 风险优化分配思路及流程

DOP的计算公式为:

$$D_{\text{DOP}}=\sqrt{\left(\boldsymbol{G}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}_{\text{obs}}\boldsymbol{G}\right)_q^{-1}} \quad (16)$$

式中,$\boldsymbol{W}_{\text{obs}}$为当前观测的权阵[23]。

由式(7)和式(16)可知,DOP与$\sigma_q^{(k)}$的计算方法相近[24],且保护级的高斯项V_q^{I}存在优化空间,其值取决于不同子集定位解的标准差$\sigma_q^{(k)}$及其完好性风险和连续性风险。因此,后续通过实验来分析不同DOP值的子集对完好性风险和连续性风险的贡献,旨在合理分配风险。

2.2.1 完好性风险优化分配

该部分实验对最大和最小DOP值子集对应的卫星均添加3组相同的突变故障,其故障检验统计量序列如图1所示。

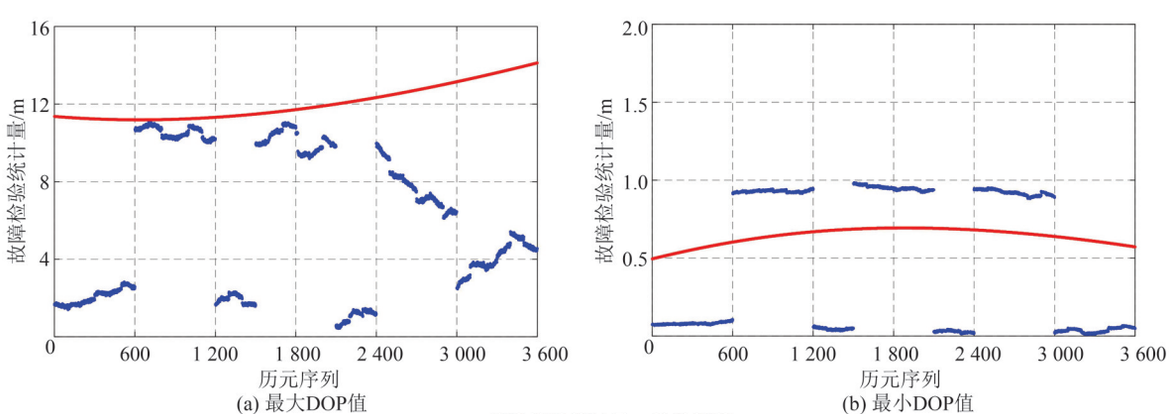


图1 不同DOP值子集对故障检验统计量的影响

Fig. 1 Effect of Different Subsets of DOP Values on Fault Test Statistics

由图 1 可知，最大和最小 DOP 值子集的故障检验统计量均可反映定位误差的变化，但两者检验统计量的波动程度及其与阈值的关系存在差异：相较最小 DOP 值子集，最大 DOP 值子集的检验统计量波动剧烈，但未检测出故障，即该子集所隔离的卫星对定位贡献较大，且面临较大的漏警风险。因此，在风险分配环节，最大 DOP 值子集应承担更多的完好性风险。

2.2.2　连续性风险优化分配

对于最小 DOP 值子集而言，其所隔离卫星对定位贡献较小，同时考虑到复杂场景不可避免地存在各种信号异常，故障检验统计量可能频繁大于阈值，进而导致连续性能力的缺失。本文基于“避免定位贡献大对应卫星的漏警风险”原则，即假设 DOP 值越大的子集面临较大的连续性风险，并重构其故障检验阈值，效果如图 2 所示。

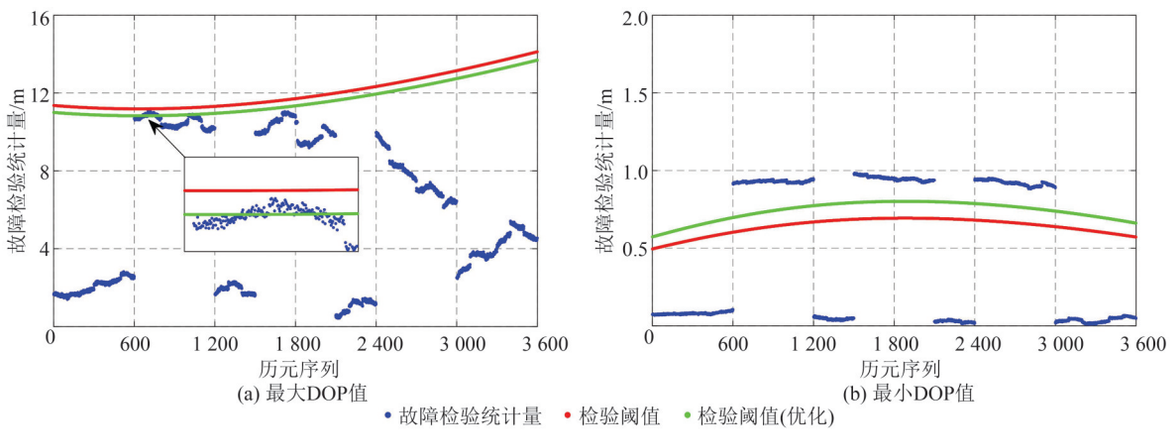


图 2　不同 DOP 值子集对故障检验统计量的影响（优化阈值）

Fig. 2　Effect of Different Subsets of DOP Values on Fault Test Statistics (Optimal Threshold)

由图 2 可知，对于最大 DOP 值子集而言，经连续性风险优化后的故障检验阈值得以降低，在一定程度上缓解了定位贡献较大卫星的漏警风险，同时规避了最小 DOP 值子集在复杂场景中的频繁误警。因此，在后续实验中将 DOP 值较大的子集分配较多的连续性风险，进一步保障终端运行的连续性。

基于上述分析，本文围绕 DOP 值提出一种 ARAIM 风险优化分配方法，保护级优化问题的数学表达形式为：

$$\begin{cases}\text{minimize}\left\{\max\left(V_q^{(0)}\left(P_{\text{HMI},q}^{(0)},D_{\text{DOP}}^{(0)}\right),V_q^{(k)}\left(P_{\text{fa},q}^{(k)},P_{\text{HMI},q}^{(k)},D_{\text{DOP}}^{(k)}\right)\middle|\left(f_k,N_{\text{opt}}\right)\right)\right\},k=1,2,\cdots,N_{\text{set}}\\ \text{满足}\begin{cases}\sum\limits_{k=0}^{N_{\text{set}}}P_{\text{HMI},q}^{(k)}\leqslant P_{\text{HMI},q}\\ \sum\limits_{k=1}^{N_{\text{set}}}P_{\text{fa},q}^{(k)}\leqslant P_{\text{fa},q}\end{cases}\end{cases}\tag{17}$$

式中，f_k 为风险分配系数；N_{opt} 为优化集所含子集数。顾及 DOP 值的 ARAIM 风险优化分配方法的详细流程如图 3 所示。

首先，计算不同子集的 DOP 值并按从大到小的顺序排序；其次，将排序后的 DOP 值序列中前 N_{opt} 个子集划分为优化集，其分配比例为 f_k，剩余子集归为正常集，其对应分配系数为 $1-f_k$；然后，根据各子集 DOP 值在所属集合内部的占比情况进行局部的风险分配，分配策略见式（18）；最后，通过动态调整风险分配系数和优化集所含子集数，迭代计算至优化前后的保护级之差小于 0.05 m。该方法旨在通过风险优化分配方式使得保护级序列更加集中，进而实现保护级的优化计算。

$$R_i=\frac{D_{\text{DOP},i}}{\text{sum}\left(D_{\text{DOP},i}\right)},i=1,2,\cdots,N_{\text{ele}}\tag{18}$$

式中，R_i 为某子集 DOP 值在所属集合中的占比，其中 i 为子集在集合内部的索引计数；$D_{\text{DOP},i}$ 为所属集合内部子集 i 的 DOP 值；sum( ) 为求和符号；N_{ele} 为指定集合内部的子集个数。

3　算例分析

在全球范围内均匀选取 10 个多 GNSS 实验（multi-GNSS experiment，MGEX）测站 2023 年年积日（day of year，DOY）100 的北斗卫星导航系统（BeiDou satellite navigation system，BDS）和 GPS 观测数据作为静态场景的数据，采样间隔为

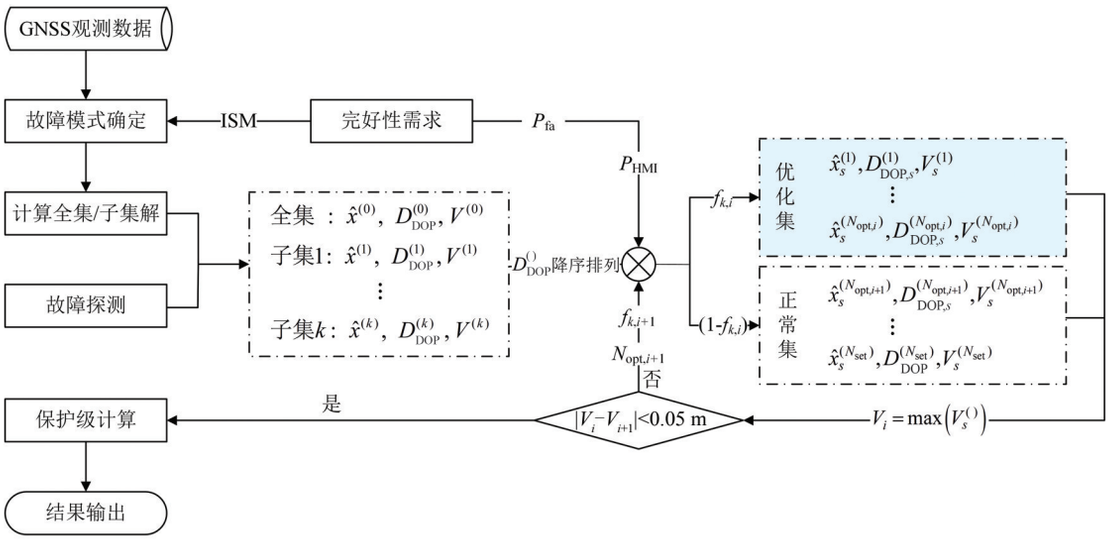


图3 顾及DOP值的ARAIM风险优化分配方法的流程

Fig. 3 Flowchart of ARAIM Risk Optimization Allocation Method Considering DOP Value

30 s,测站分布如图4所示。此外,为较好地测试所提方法的性能,采用两种类型的动态数据进行验证:(1)陕西省西安市的动态车载数据,采集时间为2023年DOY 54,时长共计36 min,采样间隔为1 s,其动态路径如图5(a)所示;(2)辽宁省沈阳市的航空实测数据,采集时间为2020年DOY 269,时长约为4 h,采样间隔为1 s,其飞行轨迹见图5(b)。实验配置项见表2,所分析的主要内容包括:

1)基于静态数据分析本文所提风险分配方法对保护级的影响,并与半区间搜索法对比展现所提方法的有效性;

2)采用动态数据来验证本文所提方法的适用性;

3)评估全球范围内BDS和BDS/GPS ARAIM保护级的改善幅度,并分析卫星观测几何结构对本文所提方法的影响。

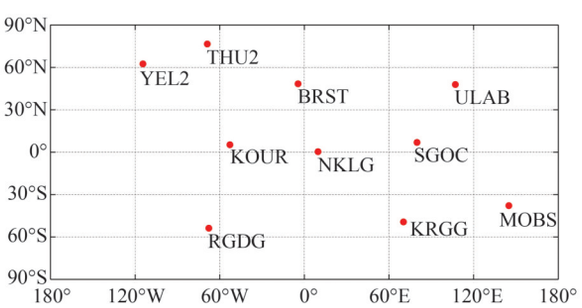
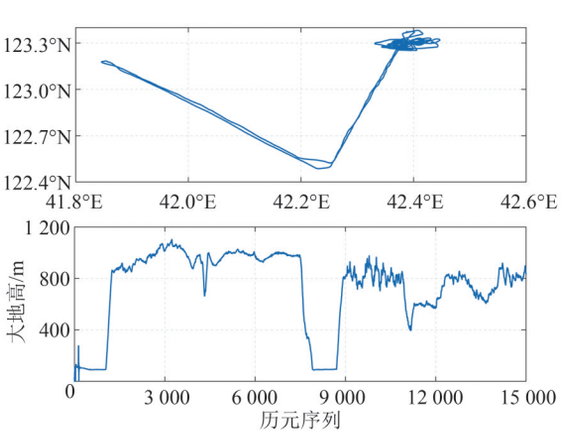


图4 MGEX测站分布图

Fig. 4 Distribution of MGEX Stations



(a) 车载运动轨迹



(b) 航空实测路线

图5 动态实验数据

Fig. 5 Kinematic Experimental Data

3.1 静态场景

本节实验采用全球10个MGEX测站的BDS和GPS观测数据进行测试。鉴于图幅限制,仅展示ULAB和YEL2测站的保护级和可视卫星数,如图6和图7所示,其余测站的统计结果见表3。

图例中优化前后的保护级分别对应风险平

表 2　实验配置项

Table 2　Experimental Settings

系统/频点	截止高度角/(°)	σ_{URA}/m	σ_{URE}/m	b_{nom}/m	P_{sat}/h^{-1}	P_{HMI}/h^{-1}
BDS: B1/B3 GPS: L1/L2	10	1	0.5	0.1	1×10^{-5}	1×10^{-7}

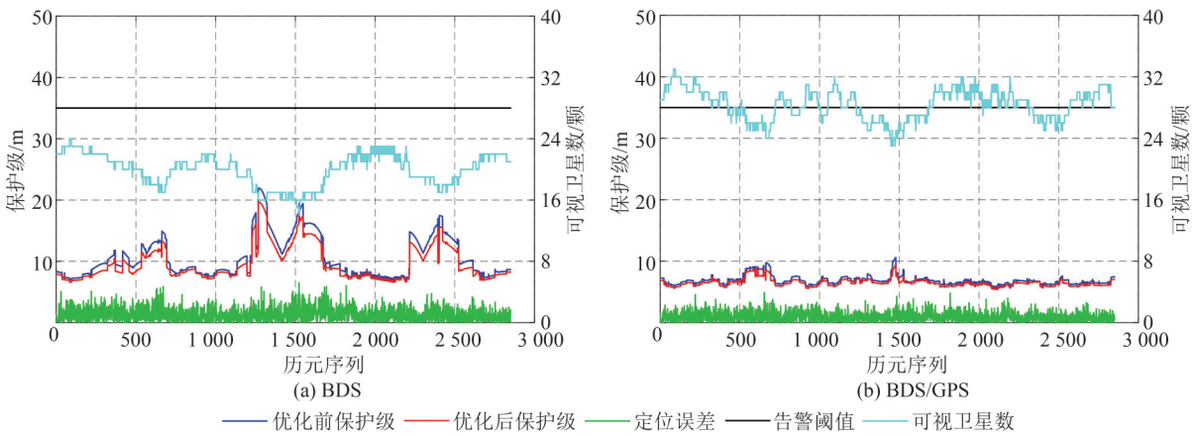


图 6　UALB 测站实验结果

Fig. 6　Experimental Results of UALB Station

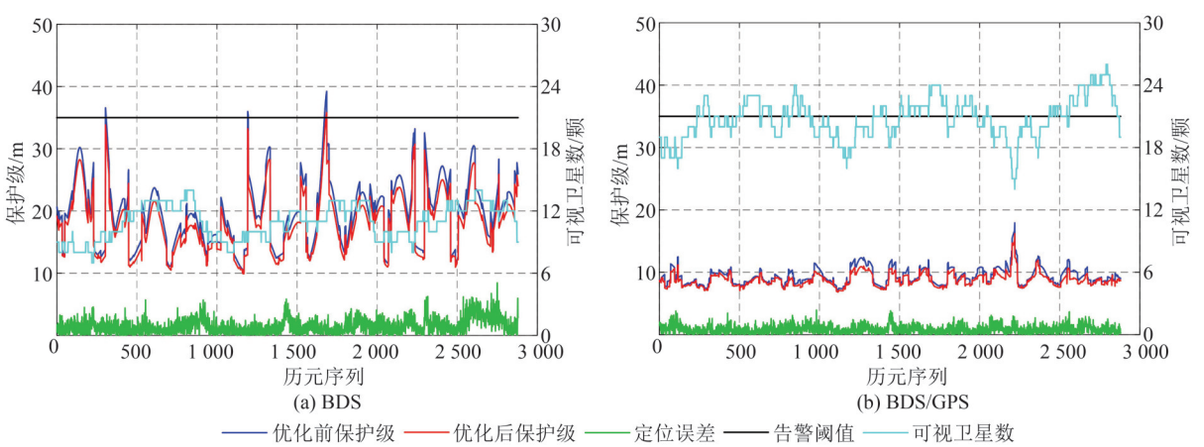


图 7　YEL2 测站实验结果

Fig. 7　Experimental Results of YEL2 Station

均方法和本文方法,由图 6 可知,相较于风险平均分配方法,本文方法计算的保护级实现了对定位误差更为紧致的包络,即在满足完好性风险和连续性风险的前提下,缓解了风险平均方法导致保护级计算保守的问题。此外,对比图 6(a)和 6(b)可以看出,相较于 BDS,BDS/GPS 组合可显著改善保护级,可较好满足终端用户对高可靠导航定位的需求。由图 7 可知,鉴于 YEL2 测站可视卫星较少且波动幅度较大,对应保护级序列剧烈抖动。经查这是由于部分历元可见卫星数较少,导致卫星观测几何结构变差,进而影响保护级。

为较好地展现本文所提 ARAIM 风险优化分配方法的有效性,该部分将其与半区间搜索法计算的保护级进行比较,结果见表 3。此外,在此引入评价指标改善率 E,用于表示半区间搜索和所提方法的保护级相较风险平均分配的改善率,计算公式为:

$$E_i=\frac{V_i-V_{nom}}{V_{nom}}\times100\% \tag{19}$$

式中,下标 i 是指不同方法的标识;下标 nom 表示风险平均分配方法。

在表 3 中,下标 mid 和 opt 分别表示半区间搜索法和所提的风险优化分配方法。从中可知,相较于风险平均分配方法,所提方法在 BDS 和

表3 不同风险分配方法对应的实验统计结果

Table 3 Experimental Statistics Results Corresponding to Different Risk Allocation Methods

测站	BDS					BDS/GPS				
	V_{nom}/m	V_{mid}/m	V_{opt}/m	E_{mid}/%	E_{opt}/%	V_{nom}/m	V_{mid}/m	V_{opt}/m	E_{mid}/%	E_{opt}/%
BRST	21.1	19.8	19.4	6.2	8.1	8.4	8.0	8.0	4.8	4.8
KRGG	13.1	12.2	12.1	6.9	7.6	7.8	7.4	7.4	5.1	5.1
KOUR	22.9	21.6	21.2	5.7	7.4	9.4	8.8	8.7	6.4	7.4
MOBS	12.2	11.4	11.3	6.6	7.4	7.7	7.3	7.3	5.2	2.5
NKLG	20.0	18.8	18.6	6.0	7.0	9.0	8.4	8.3	6.7	7.8
RGDG	47.2	44.8	42.5	5.1	10.0	8.8	8.3	8.3	5.7	5.7
SGOC	8.0	7.7	7.7	3.8	3.8	6.6	6.3	6.3	4.5	4.5
THU2	23.5	21.9	21.6	6.8	8.1	11.1	10.5	10.5	5.4	5.4
ULAB	10.5	9.8	9.6	6.7	8.6	6.9	6.5	6.5	5.8	5.8
YEL2	19.7	18.4	18.2	6.6	7.6	9.4	8.8	8.8	6.4	6.4
均值	19.8	18.6	18.2	6.0	7.5	8.5	8.0	8.0	5.6	5.8

BDS/GPS的保护级均有不同程度的改善,其中,BDS的保护级平均改善率为7.5%,优于BDS/GPS,这是因为ARAIM算法取决于卫星数及其观测几何结构[9],可视卫星数越多,其卫星观测几何结构较好,各子集的保护级相对集中,进而导致风险分配方法对保护级影响效果降低。此外,相较半区间搜索法,本文所提风险优化分配方法对保护级改善率更优,优化后保护级均可包络位置误差,且未出现完好性风险事件。

3.2 动态场景

本节实验采用车载动态和航空实测数据验证风险优化分配方法的有效性和适用性。考虑到跑车试验场附近存在基准站,后续将实时动态差分(real-time kinematic, RTK)固定解视为真值,进而绘制定位误差。考虑到斯坦福图能较好呈现保护级、定位误差和告警阈值的几何关系[6],且直观反映完好性风险和ARAIM算法的可用性,为此该部分绘制斯坦福图来分析保护级优化后的效果。车载动态和航空实测数据的实验结果分别见图8和图9。

由图8可知,风险优化分配方法对应的保护级序列在包络定位误差的基础上,有效降低保护级,经统计BDS和BDS/GPS对应保护级改善率分别为11.6%和10.3%,且未触发漏警事件,即相较于平均分配方法,风险优化分配可紧致包络定位误差。考虑到该组航空飞行数据无基准值,此处采用文献[5]的方法估计其定位误差。从图9中也可以看出,航空数据的保护级改善效果较为明显,BDS对应的保护级改善率达8.8%,BDS/GPS为6.0%。从上述现象可知,风险优化分配方法同样适用于动态场景,可满足动态用户对高可靠导航定位的需求。

3.3 全球预测

在采用静态和动态实测数据分析风险优化分配方法的基础上,将全球按照3°×3°的格网间隔进行划分,通过仿真来评估全球范围内BDS和BDS/GPS的保护级改善幅度。在此过程中,设置不同截止高度角来调整卫星观测几何结构,并分析其对风险优化分配方法的影响。本节实验所设定截止高度角有10°、15°、20°和25°,所提方法对BDS和BDS/GPS组合的保护级改善效果分别如图10和图11所示。

为更好地量化分析不同截止高度角在全球范围内保护级的改善幅度,将全球划分为亚太和非亚太地区,其中,亚太地区的格网范围为70°E—140°E,60°S—60°N,统计结果见表4。

由图10、11和表4可知,风险优化分配方法对应保护级改善幅度较为明显,且随着截止高度角增加而递增,在一定程度上缓解保护级计算保守的问题。然而不同系统及区域的保护级优化效果存在差异,对于不同卫星系统而言,本文所提方法对单BDS的改善效果优于BDS/GPS,以亚太地区为例,两者对应保护级的平均改善幅度分别为1.0 m和0.6 m。在不同区域范围内,所提方法对非亚太地区的优化幅度高于亚太地区,单BDS在两区域内保护级的平均优化幅度分别为3.6 m和1.0 m。上述现象是由于BDS/GPS组合情形下卫星观测几何结构较好,导致所提方法的保护级改善效果不明显,该结论可与上文实测结果相互印证。

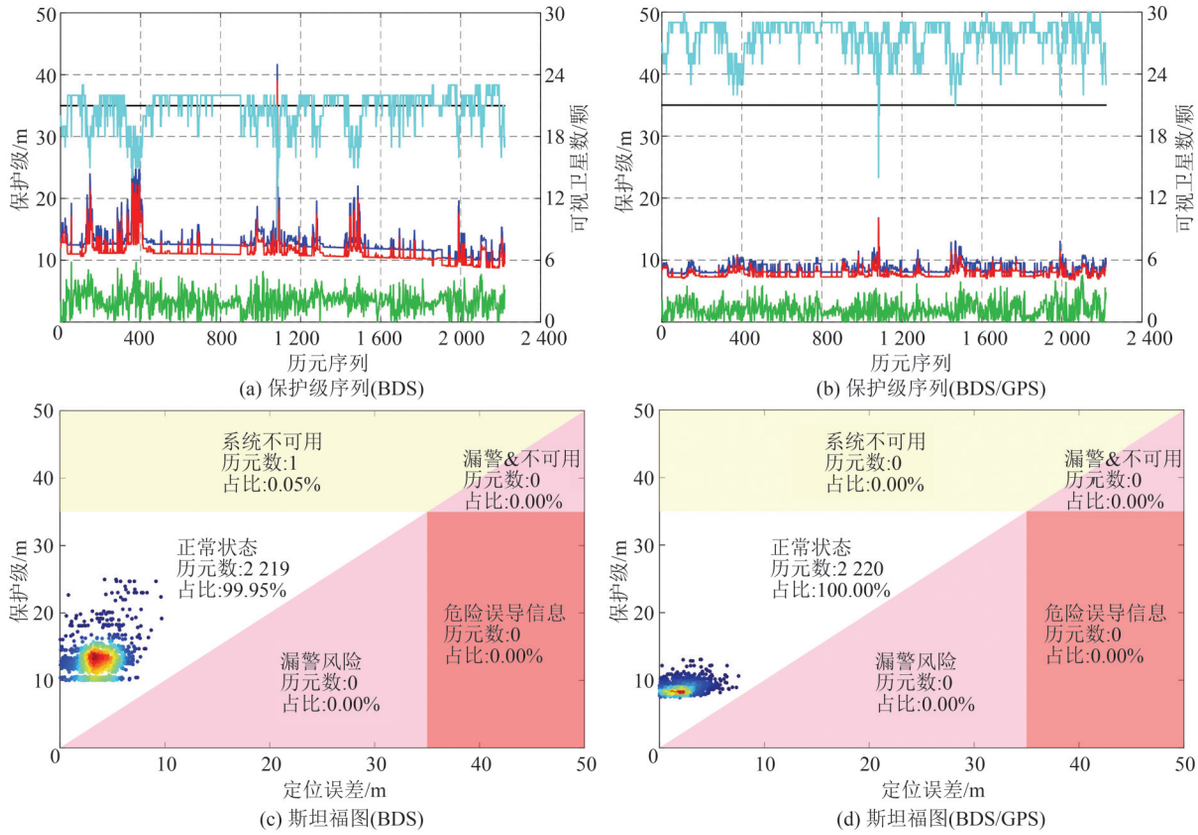


图 8　车载实验结果

Fig. 8　Vehicle Experimental Results

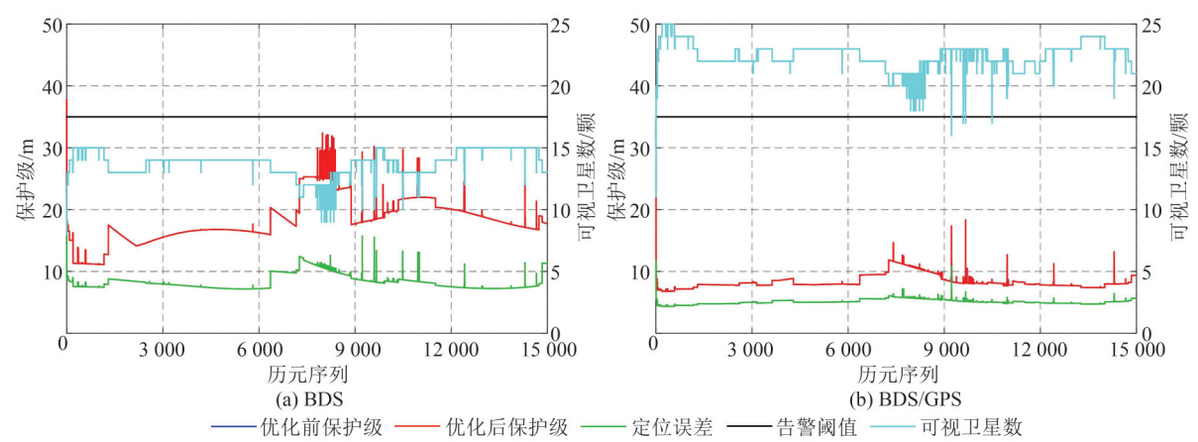


图 9　航空实验结果

Fig. 9　Aeronautical Experimental Results

4　结　语

针对传统 MHSS ARAIM 算法将完好性风险和连续性风险平均分配导致保护级计算保守的问题,本文梳理了影响保护级计算的两类因素,并评估不同子集所应承担的完好性和连续性风险,提出一种顾及 DOP 值的 ARAIM 风险优化分配方法。采用静态、动态和仿真 3 种实验验证了本文所提方法的有效性和适用性,得到如下结论:

1)相较于风险平均分配方法,所提方法在满足完好性和连续性风险的前提下,实现保护级对定位误差更为紧致的包络,且其优化效果高于半区间搜索法。BDS 在所选 MGEX 测站、车载及航空实验中的保护级改善率分别为 7.5%、11.6% 和 8.8%,较好地缓解了保护级计算保守的问题。

2)本文所提方法对保护级的改善效果与卫星观测几何结构密切相关,导致在不同系统及区域中保护级的改善效果存在差异。对于不同系统而言,所提方法在非亚太地区的改善幅度优于

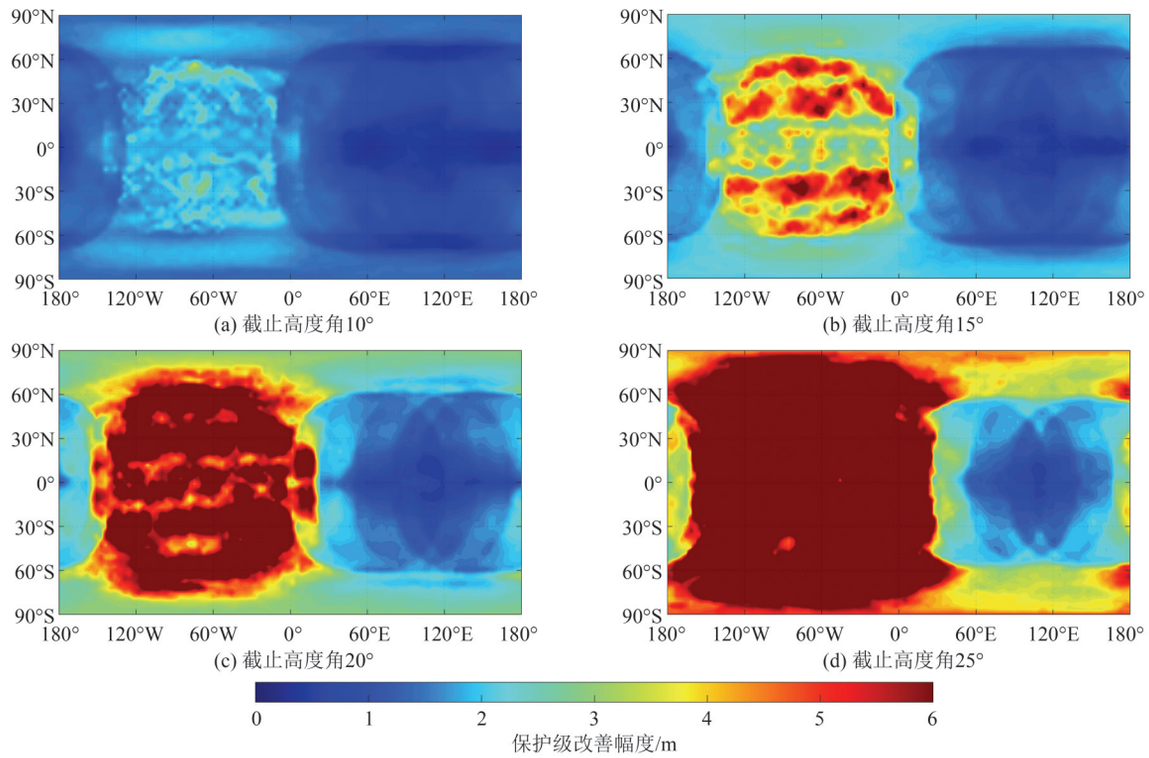


图10 单BDS情形下不同截止高度角对风险优化分配方法的影响

Fig. 10 Impact of Different Elevation Cutoff Angle on the Optimal Risk Allocation Method for BDS

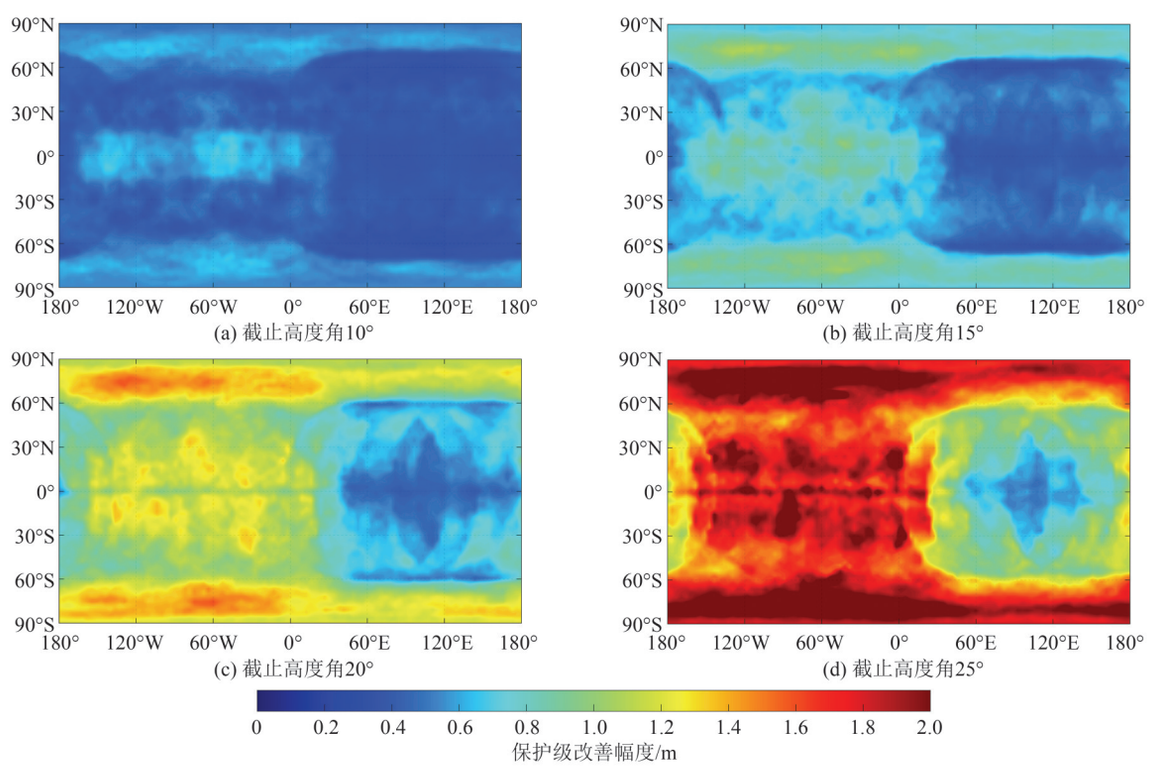


图11 BDS/GPS组合情形下不同截止高度角对风险优化分配方法的影响

Fig. 11 Impact of Different Elevation Cutoff Angle on the Optimal Risk Allocation Method for BDS/GPS

亚太地区,单BDS优化幅度分别为3.6 m和1.0 m。在亚太地区,本文方法对BDS优化效果强于BDS/GPS,两者改善幅度分别为1.0 m和0.6 m。

致谢:感谢中国电子科技集团公司第二十研究所邵搏、原彬和张键为本文研究提供了实测飞行数据。

表 4　所提方法在不同截止高度角、所选系统及区域内的保护级改善幅度/m

Table 4　Protection Level Improvement of the Proposed Method for Different Elevation Cutoff Angles, Selected Systems and Areas/m

截止高度角/(°)	亚太地区		非亚太地区	
	BDS	BDS/GPS	BDS	BDS/GPS
10	0.7	0.4	1.4	0.5
15	0.9	0.4	2.4	0.7
20	1.1	0.6	4.0	1.1
25	1.5	0.8	6.4	1.6
均值	1.0	0.6	3.6	1.0

参　考　文　献

[1] 李博峰, 苗维凯, 陈广鄂. 多频多模 GNSS 高精度定位关键技术与挑战[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(11): 1769-1783.
LI Bofeng, MIAO Weikai, CHEN Guang'e. Key Technologies and Challenges of Multi-frequency and Multi-GNSS High-Precision Positioning[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(11): 1769-1783.

[2] 李子申, 王宁波, 李亮, 等. 北斗高精度高可信 PPP-RTK 服务基本框架[J]. 导航定位与授时, 2023, 10(2): 7-15.
LI Zishen, WANG Ningbo, LI Liang, et al. Basic Framework of BDS-Based High-Precision and High-Credibility PPP-RTK Service[J]. *Navigation Positioning and Timing*, 2023, 10(2): 7-15.

[3] 苏先礼. GNSS 完好性监测体系及辅助性能增强技术研究[D]. 上海:上海交通大学, 2013.
SU Xianli. The Research on GNSS Integrity Monitoring Theory and Assisted Performance Enhancement Technique[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013.

[4] 王尔申, 杨迪, 宏晨, 等. ARAIM 技术研究进展[J]. 电信科学, 2019, 35(8): 128-138.
WANG Ershen, YANG Di, HONG Chen, et al. Research Progress of ARAIM Technology[J]. *Telecommunications Science*, 2019, 35(8): 128-138.

[5] WGC. ARAIM Technical Subgroup Milestone 3 Report [EB/OL]. (2016-02-25) [2025-07-23]. https://www.gps.gov/policy/cooperation/europe/2016/working-group-c/ARAIM-milestone-3-report.pdf.

[6] HEXAGON. Quantifying Integrity [EB/OL]. (2019-12-25)[2025-07-23]. https://www.calameo.com/read/001915796d0c25e242b9f? authid=CARc2zXXAg5Q.

[7] DOD. 2017 Federal Radionavigation Plan [EB/OL]. (2017-09-20)[2025-07-23]. https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/32801.

[8] WANG S Z, ZHAN X Q, ZHAI Y W, et al. Ensuring High Navigation Integrity for Urban Air Mobility Using Tightly Coupled GNSS/INS System[J]. *Journal of Aeronautics, Astronautics and Aviation*, 2020, 52(4): 429-442.

[9] 赵昂, 杨元喜, 许扬胤, 等. GNSS 单系统及多系统组合完好性分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(1): 72-80.
ZHAO Ang, YANG Yuanxi, XU Yangyin, et al. Integrity Analysis of GNSS Single System and Multi-system Combination[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(1): 72-80.

[10] 邓思瑜,孙蕊. 基于风险优化分配的 ARAIM 保护级计算方法[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2024,43(6):63-70.
DENG Siyu, SUN Rui. ARAIM Protection Level Calculation Method Based on Optimal Allocation of Risk[J]. *Journal of Xihua University(Natural Science Edition)*, 2024,43(6):63-70.

[11] EL-MOWAFY A, YANG C. Limited Sensitivity Analysis of ARAIM Availability for LPV-200 over Australia Using Real Data[J]. *Advances in Space Research*, 2016, 57(2): 659-670.

[12] BLANCH J, WALTER T, ENGE P. RAIM with Optimal Integrity and Continuity Allocations Under Multiple Failures[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2010, 46(3): 1235-1247.

[13] BLANCH J, WALTER T, ENGE P. Optimal Positioning for Advanced Raim[J]. *Navigation*, 2013, 60(4): 279-289.

[14] 王尔申, 孙薪蕙, 曲萍萍, 等. 基于动态粒子群算法的 ARAIM 可用性优化方法[J]. 测绘学报, 2024, 53(1): 137-145.
WANG Ershen, SUN Xinhui, QU Pingping, et al. ARAIM Availability Optimization Method Based on Dynamic Particle Swarm Optimization Algorithm[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2024, 53(1): 137-145.

[15] 韩清清, 王利, 罗思龙, 等. ARAIM 算法的风险概率优化分配[J]. 测绘学报, 2021, 50(12): 1751-1761.
HAN Qingqing, WANG Li, LUO Silong, et al. Optimal Allocation of Risk Probability Based on ARAIM Algorithm[J]. *Acta Geodaetica et Carto-*

graphica Sinica, 2021, 50(12): 1751-1761.

[16] LI Y, ZHANG Z T, HE X F, et al. Realistic Stochastic Modeling Considering the PDOP and Its Application in Real-Time GNSS Point Positioning Under Challenging Environments[J]. *Measurement*, 2022, 197: 111342.

[17] BLANCH J, WALTER T, ENGE P, et al. Baseline Advanced RAIM User Algorithm and Possible Improvements[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2015, 51(1): 713-732.

[18] BLANCH J, WALTER T, ENGE P, et al. Advanced RAIM User Algorithm Description: Integrity Support Message Processing, Fault Detection, Exclusion, and Protection Level Calculation[C]// The 25th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation, Nashville, TN, 2012.

[19] 吴云. 最优估计与假设检验理论及其在GNSS中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
WU Yun. Optimal Estimation and Hypothesis Testing Theory and Its Application in GNSS[M]. Beijing: Science Press, 2015.

[20] 李彬, 吴云, 李征航. GNSS接收机自主完备性监测高级算法的有效性验证[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2015, 40(6): 800-804.
LI Bin, WU Yun, LI Zhenghang. Validation of the GNSS Advanced ARAIM Algorithm[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(6): 800-804.

[21] LI L, WANG H, JIA C, et al. Integrity and Continuity Allocation for the RAIM with Multiple Constellations[J]. *GPS Solutions*, 2017, 21(4): 1503-1513.

[22] 牛飞, 陈金平, 高为广, 等. 非正态分布假设下的完好性阈值计算与分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2012, 37(12): 1429-1433.
NIU Fei, CHEN Jinping, GAO Weiguang, et al. Calculation and Analysis on Integrity Threshold Based on Non-Gaussian Distributing[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(12): 1429-1433.

[23] TENG Y L, WANG J L. New Characteristics of Geometric Dilution of Precision (GDOP) for Multi-GNSS Constellations[J]. *Journal of Navigation*, 2014, 67(6): 1018-1028.

[24] QI H T, WANG X, CUI X W, et al. ARAIM Based on Fault Detector Reuse for Reducing Computational Load[J]. *GPS Solutions*, 2023, 27(2): 78.

(上接第1966页)

New York: Springer, 1992.

[30] POLITIS D N, ROMANO J P. The Stationary Bootstrap[J]. *Journal of the American Statistical Association*, 1994, 89(428): 1303-1313.

[31] FUERTES A M. Sieve Bootstrap t-Tests on Long-Run Average Parameters[J]. *Computational Statistics & Data Analysis*, 2008, 52(7): 3354-3370.

[32] LAHIRI S N. Resampling Methods for Dependent Data[M]. New York: Springer, 2003.

[33] XU P L, LIU J N, SHI C. Total Least Squares Adjustment in Partial Errors-in-Variables Models: Algorithm and Statistical Analysis[J]. *Journal of Geodesy*, 2012, 86(8): 661-675.

[34] 王乐洋, 许光煜, 温贵森. 一种相关观测的Partial EIV模型求解方法[J]. 测绘学报, 2017, 46(8): 978-987.
WANG Leyang, XU Guangyu, WEN Guisen. A Method for Partial EIV Model with Correlated Observations[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(8): 978-987.

[35] SAHINLER S, DERVIS T. Bootstrap and Jackknife Resampling Algorithms for Estimation of Regression Parameters[J]. *Journal of Applied Quantitative Methods*, 2007, 2(2): 188-199.

[36] HALL P, HOROWITZ J L, JING B Y. On Blocking Rules for the Bootstrap with Dependent Data[J]. *Biometrika*, 1995, 82(3): 561-574.

[37] EFRON B. Nonparametric Standard Errors and Confidence Intervals[J]. *Canadian Journal of Statistics*, 1981, 9(2): 139-158.

[38] EFRON B, TIBSHIRANI R. Bootstrap Methods for Standard Errors, Confidence Intervals, and Other Measures of Statistical Accuracy[J]. *Statistical Science*, 1986, 1(1): 54-75.

[39] STINE R. An Introduction to Bootstrap Methods[J]. *Sociological Methods & Research*, 1989, 18(2/3): 243-291.

[40] LÉGER C, POLITIS D N, ROMANO O P. Bootstrap Technology and Applications[J]. *Technometrics*, 1992, 34(4): 378-398.