基于混合星座的卫星导航系统功率增强服务性能分析*

吕志成,张勇虎,刘增军,王飞雪
(国防科技大学 电子科学与工程学院,湖南 长沙 410073)

摘 要:在导航战中,卫星功率增强技术是提高战区卫星导航系统生存能力的重要措施。针对导航战背景下如何保持Compass系统对我国领土及周边区域导航服务能力的问题进行了研究,提出了一种基于混合星座和最优GDOP值准则的卫星导航系统功率增强方案,并就功率增强覆盖区域在不同实现方式条件下的覆盖性、可用性和实现复杂度等性能进行了对比分析。分析结果表明,采用"5GEO+4MEO"的功率增强组合形式,可以实现对我国领土及近海区域的全天时覆盖,可用性水平达到100%(GDOP<6.3),同时具有实现复杂度低和系统稳定性好等特点,可作为我国区域功率增强的备选方案。

关键词:导航战;混合星座;功率增强;性能评估
中图分类号:P228 **文献标识码**:A **文章编号**:1001-2486(2012)02-0076-05

An analysis of service performance for enhancing power of satellite navigation system based on mixed constellation

LV Zhicheng, ZHANG Yonghu, LIU Zengjun, WANG Feixue
(College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: In navigation war, the technique of satellite power-enhancement has been an important measure to improve the viability of the satellite navigation system. With regard to the problem about how to maintain the navigation capabilities of Compass system for the territory of China and the surrounding area in the context of navigation war, this researcg presents a satellite navigation system power enhancement program based on mixed constellation and guidelines of best GDOP value. Then, the effect to the performance of coverage, availability and implementation complexity in area covered by power enhancement signals under different realization types was analyzed. The results from simulation show that '5GEO+4MEO' combination of power enhancement can achieve all-time coverage with the avalibility level of 100% (GDOP<6.3) for our country's territory and coastal regions. Furthermore, this scheme also has the quality of low complexity and good stability and can be introduced as a regional power enhanced options.

Key words: navigation war; mixed constellation; power enhanced; performance evaluation

在未来导航战背景下,如何有效保护和保持己方军用导航信号在复杂电磁环境中的服务能力,是导航战研究的重要内容之一[1-2]。在战时软杀伤和硬摧毁并存的恶劣电磁环境下,常规卫星导航信号易被干扰导致接收信号质量下降甚至无法使用,通过提高卫星军用导航信号的发射功率,可以使导航信号覆盖区域内导航信号强度大幅度提高,从而恢复对抗环境下的导航定位服务。因此,有必要研究卫星导航系统军用导航信号功率增强的管理控制策略。

北斗卫星导航系统(Compass)采用被动定位方式,卫星星座为包括GEO卫星、IGSO卫星和MEO卫星在内的混合星座,其中GEO卫星实现对中国大陆及周边区域的增强覆盖,IGSO实现对高纬度地区的覆盖,MEO卫星实现对全球范围的多重覆盖[3-5]。我国卫星导航系统的地面段运行控制系统主要布设在我国领土范围内,可实现对GEO卫星的全时段监控。因此,对于我国领土及其周边区域来说,从控制的复杂度和卫星信号覆盖范围来看,以GEO卫星为主、MEO卫星为辅的卫星信号功率增强策略是较为合理的选择。本文在仿真上述Compass系统混合星座的基础上,以保持战时我国领土及其周边区域的导航服务为目标,分析了卫星导航信号功率增强实现方式及其对战区服务性能的影响。

1 星座仿真与性能分析

1.1 星座仿真

参考Compass星座构型的设计规划[4-5],考虑GEO卫星对我国领土及周边区域的全天时多

* 收稿日期:2011-12-17
作者简介:吕志成(1982—),男,内蒙古赤峰人,博士研究生,E-mail:chifeng21@163.com;
王飞雪(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:wangfeixue365@sina.com

重覆盖,以及 MEO 卫星数量多几何构型好的特点,本文仿真的星座由 5 颗 GEO 卫星和 27 颗 MEO 卫星组成,其中 5 颗 GEO 卫星分布在 158.75°E、180°E、210.5°E、240°E 和 260°E 的赤道上空,27 颗 MEO 卫星形成 Walker 27/3/1 构型。卫星轨道的具体参数如表 1 所示。

表 1　仿真星座基本参数

Tab. 1　The parameters of simulated constellation

卫星类型	GEO	MEO
长半轴/(km)	42 164	27 878
偏心率	0	0
轨道倾角/(°)	0	55
升交点赤经/(°)	158.75/180/210.5/240/260	0/120/240
近地点角距/(°)	0	0
平近点角/(°)	0	0/40/80/120/160/200/240/280/320
卫星数	5	27
平面数	1	3

1.2　性能分析

取卫星信号接收截止角为 5°,观测历元采样间隔为 15min,将全球按经纬度 5°×5°间隔划分成若干区域,分析 24h 内仿真星座对全球不同区域的服务性能。图 1 绘出了 GEO 卫星在全球范围内的覆盖区域分布情况,从图中可以看到,我国大部分地区及附近海域均处于 GEO 卫星 5 重覆盖范围,东北和西北部分地区处于 GEO 卫星 4 重覆盖范围,全球超过 50% 的区域处于 GEO 卫星覆盖范围内,因此,GEO 卫星对于提高我国领土及周边区域的导航服务性能具有重要的意义。图 2 是 24h 内全球各区域 MEO 卫星最小可见数量分布,由 27 颗 MEO 卫星构成的 Walker 27/3/1 星座可以使全球范围内达到 5 ~ 10 重的覆盖效果,在我国领土范围内最小可见卫星个数也在 5 ~ 7 颗。图 3 表明全球各区域 GDOP 平均取值在 1.3 ~ 2.2,由于 GEO 卫星的存在,使得我国领土范围内的 GDOP 平均取值减小至 1.4 ~ 1.6。

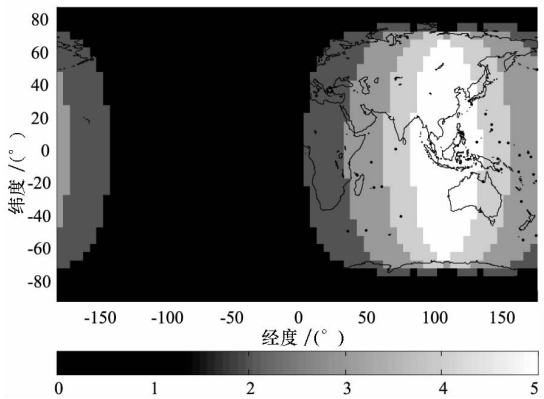


图 1　GEO 卫星覆盖范围分布图

Fig. 1　The area distribution covered by GEO satellites over the world

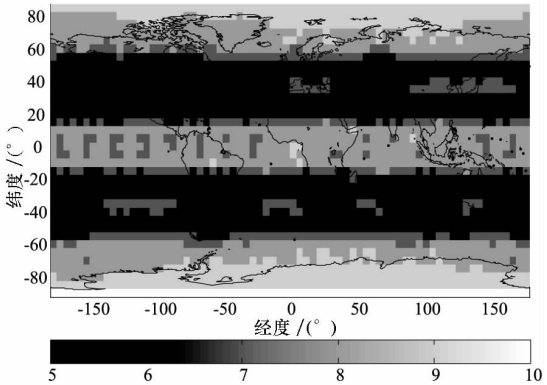


图 2　24h MEO 卫星最少可见个数分布图

Fig. 2　The area distribution of minimum number of visible MEO satellites over 24 hour period

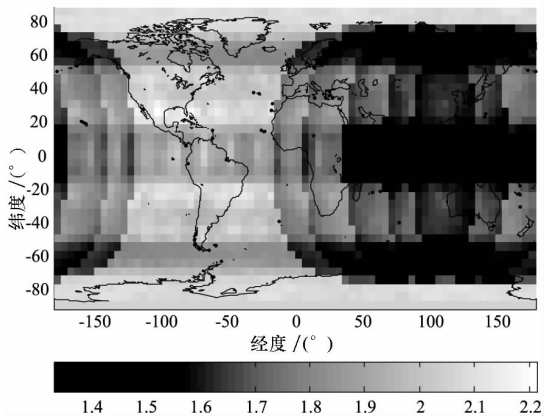


图 3　24h GDOP 平均值分布图

Fig. 3　The area distribution of average of GDOP value over 24 hour period

2　卫星功率增强方案设计

通过上述仿真星座在全球范围内的覆盖性和 GDOP 取值等分析结果,可以看到,我国领土及周边区域始终处于 GEO 卫星多重覆盖范围内,GEO 卫星可以在任何时刻为用户提供导航服务信号;同时,位于我国领土上的地面段运行控制系统也可以全天时对 GEO 卫星的工作状态进行监控。因此,当正常卫星导航信号由于受到干扰,导致我国领土及周边区域的导航服务性能严重恶化甚至中断时,通过增加 GEO 卫星导航信号的发射功率可以快速恢复和提高受干扰区域的导航服务质量。GEO 卫星近似处于同一水平面上,单独使用 GEO 卫星信号进行导航定位难以达到理想的精度,必须在此基础上选择若干数量的可视 MEO 卫星同时播发功率增强信号,优化可视卫星的空间

几何构型,提高系统的可用性和可靠性。

播发功率增强信号的 MEO 卫星的选择遵循最优 GDOP 值准则,即在 m 颗 MEO 可见卫星中选择 n 颗播发功率增强信号,使得由 GEO 卫星和 MEO 卫星组成的功率增强卫星星座在战区中心的 GDOP 取最小值,即:

$$S_{power\text{-}enhanced}(t)=\{(M_{a_1},M_{a_2},\ldots,M_{a_n}) \mid \mathrm{GDOP}=\min, a_i\in[1,m], a_i\neq a_j, i\neq j\}$$

其中,$S_{power\text{-}enhanced}(t)$表示观测历元 t 时刻播发功率增强信号的 MEO 卫星组合;GDOP 表示战区中心在观测历元 t 时刻的 GDOP 值,由播发功率增强信号的 GEO 卫星和 MEO 卫星空间几何结构决定;$M_a, a\in[1,m]$,表示观测历元 t 时刻的可见 MEO 卫星。

假设战区中心位于点位(116°E, 40°N),从图 1 可知,看到战区中心位于 5 重 GEO 卫星覆盖区域内。依据最优 GDOP 值准则,设计如下 4 种功率增强方案:(a) 5GEO + 1MEO,(b) 5GEO + 2MEO,(c) 5GEO + 3MEO,(d) 5GEO + 4MEO,分析上述功率增强方案的可行性以及对功率增强信号覆盖区域服务性能的影响。

3　功率增强对区域导航服务性能的影响分析

3.1　功率增强区域覆盖性分析

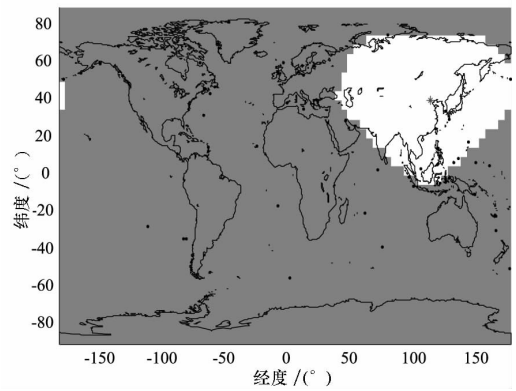
接收机进行定位解算的基本要求是同时可见卫星数不低于 4 颗,因此,功率增强覆盖区域定义为仿真时段内各观测历元同时可见卫星数不低于 4 颗,且至少包括 1 颗 MEO 卫星,即:

$$S_{pvt}=\mathop{Y}_{i=1}^{n}\{A_i\}$$

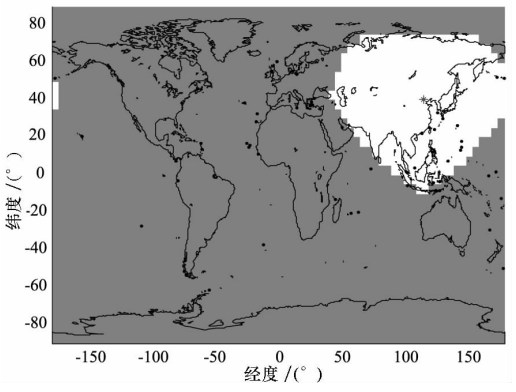
$$A_i=\begin{cases} Grid_i, & \forall t\in[0,T], S_{MEO,Grid_i}(t)\geqslant 1, S_{GEO+MEO,Grid_i}(t)\geqslant 4 \\ \Phi, & \text{其他} \end{cases}$$

式中,n 为全球各网点总数,$S_{MEO,Grid_i}(t)$表示观测历元 t 时刻格网点 $Grid_i$ 处可见的播发功率增强信号的 MEO 卫星数量,$S_{GEO+MEO,Grid_i}(t)$表示观测历元 t 时刻各网点 $Grid_i$ 处可见的播发功率增强信号的卫星总数。

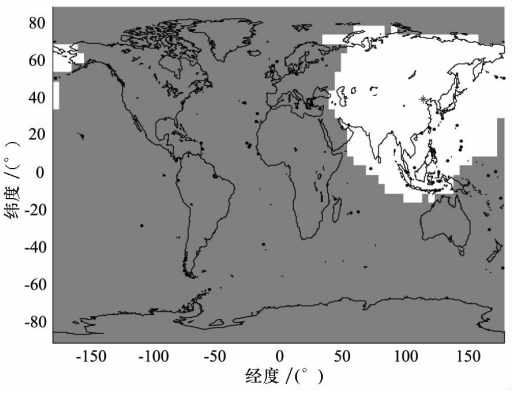
图 4 绘出了 4 种功率增强方案连续观测 24h 统计得到的功率增强覆盖区域分布情况,其中白色区域表示功率增强信号覆盖区域。4 种条件下的功率增强覆盖区域占全球面积的比例分别为 12.1% (a)、12.8% (b)、15.7% (c) 和 20.2% (d),4 种情况均可以覆盖我国领土及附近海域,随着播发功率增强信号的 MEO 卫星数量的增加,功率增强覆盖区域逐渐增大,且增加幅度也逐渐变大。



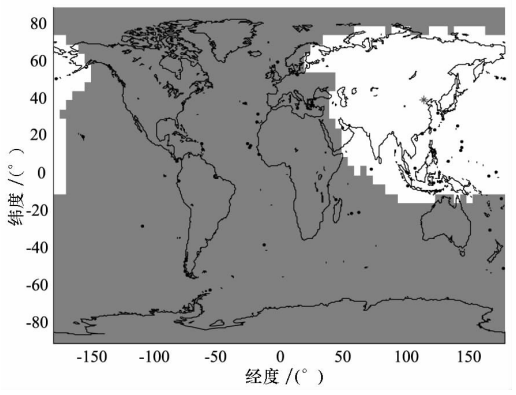
(a)5GEO + 1MEO



(b)5GEO + 2MEO



(c)5GEO + 3MEO



(d)5GEO + 4MEO

图 4　24h 功率增强覆盖区域分布图

Fig. 4　The area distribution covered by power-enhanced signals over 24 hour period

3.2　功率增强区域可用性分析

功率增强区域的可用性是指在功率增强覆盖区域提供可用导航服务的时间百分比,在这里可用导航服务等效为满足某一门限的 GDOP 取值[6]。

图 5 是应用 4 种功率增强方案战区中心 24h GDOP 值变化曲线,每种功率增强方案条件下战区中心处的 GDOP 值变化不大,随着播发功率增强信号的 MEO 卫星数量的增加,GDOP 值逐渐减小,并且后三种方案明显优于第一种方案。

取经验值 GDOP = 6.3 作为定位可用性门限[6-7],将可用性水平以 0.1 为单位划分为 10 个等级,等级 1 对应可用性水平(0,0.1],等级 2 对应可用性水平(0.1,0.2],依此类推。图 6 绘出了不同功率增强方案 24h 各可用性等级区域占全球区域的面积百分比,其中可用性水平取值在(0.9,1]的面积占功率增强覆盖区域总面积的比例均超过 50%。图 7 绘出了不同可用性等级区域分布统计结果。如图 7 可知,全时段可用区域近似为以战区中心点为中心的椭圆形区域;部分时段可用区域主要集中在全时段可用区域的左右两侧,并且可用性水平等级随着距战区中心点距离的增加而减小;随着播发功率增强信号的 MEO 卫星数量的增加,全时段可用区域面积和部分时段可用区域面积均有所增加。

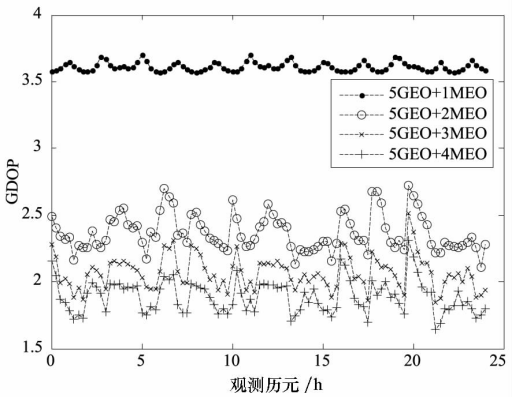


图 5　24h 战区中心 GDOP 值变化曲线

Fig. 5　The curve of GDOP value at the target over 24 hour period

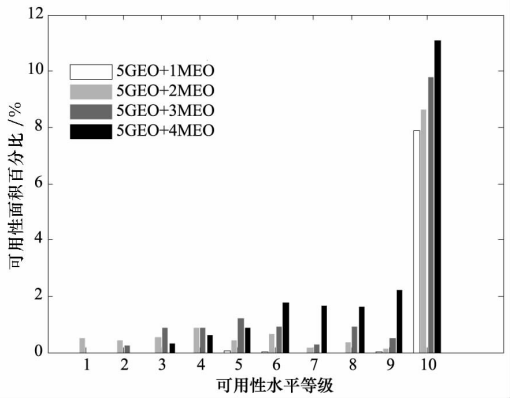
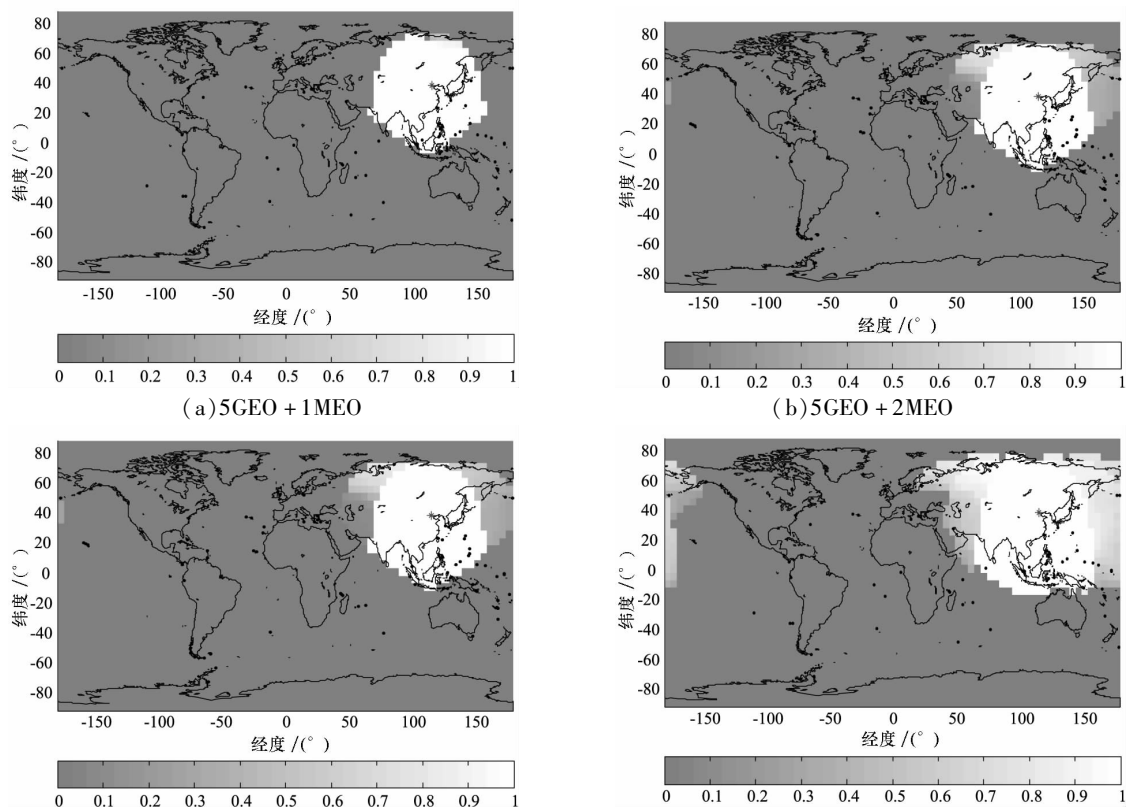


图 6　24h 具有不同可用性水平的功率增强覆盖区域对应的面积百分比

Fig. 6　The percent of area with different usability levels over 24 hour period



(a)5GEO + 1MEO　(b)5GEO + 2MEO

(c)5GEO + 3MEO　(d)5GEO + 4MEO

图 7　24h 功率增强覆盖区域可用性水平分布图

Fig. 7　The area distribution of usability levels over 24 hour period

3.3　功率增强方案实施复杂度分析

卫星功率增强信号的启用和终止均由地面注入系统通过上行注入指令的方式进行控制，控制指令注入的频度和次数决定着地面注入系统控制方案的复杂性和可靠性。由于 GEO 卫星与地球上的任意目标点具有确定性的可视关系，并且所有 GEO 卫星均处于地面注入系统的可视范围内，因此对 GEO 卫星的控制相对简单。功率增强方案的实现复杂度主要由 MEO 卫星的控制复杂度决定。4 种功率增强方案 MEO 卫星切换情况如图 8 所示，MEO 卫星切换总次数分别为 68、71、56 和 37。从图 8 中可知，在方案(a)、方案(b)和方案(c)中，均存在需要对全部功率增强 MEO 卫星进行切换操作的历元，此时将导致功率增强覆盖区域的服务性能出现短时的恶化。方案(d)中，卫星切换的次数最少，并且在切换时仍可以保证 2 ~ 3 颗 MEO 卫星的状态保持不变，可以最大限度地减小增强覆盖区域服务性能的影响。

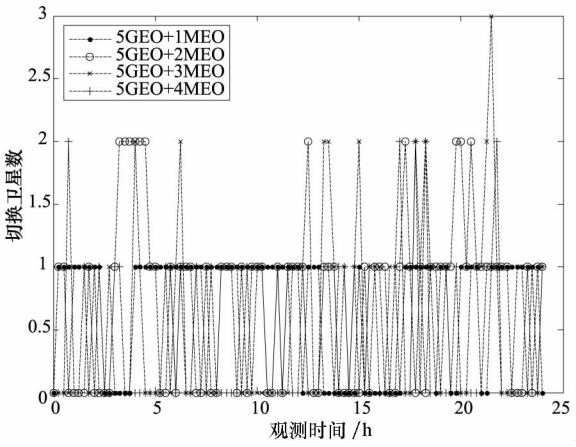


图 8　24h 播发功率增强信号的 MEO 卫星切换情况
Fig. 8　Switch number of MEO power-enhanced satellites over 24 hour period

3.4　不同 MEO 功率增强卫星数量对服务性能的影响分析

表 2 列出了 5 颗 GEO 卫星分别与不同数量的 MEO 卫星组成功率增强星座，在战区中心 GDOP 取值最小约束条件下的 24h 服务性能分析结果。随着 MEO 功率增强卫星数量的增加，战区中心的 GDOP 均值逐渐减小，覆盖区域和可用性水平取值在(0.9,1]的区域面积逐渐增加。MEO 功率增强卫星数量取为 4 颗时，战区中心 GDOP 均值降至 2 以下，我国领土大部分区域及近海区域满足 100% 的可用性水平(见图 7(d))，继续增加 MEO 功率增强卫星数量可以进一步扩大功率增强信号的覆盖范围，在改善功率增强性能的同时，也可能对战区以外的区域带来影响。

卫星功率增强技术的实现需要消耗大量的电能，频繁、长时间的发射功率增强信号将对卫星的寿命产生不利影响。因此，功率增强卫星的选择是星上资源消耗与功率增强效能的一种折中考虑。

4　结　论

以 Compass 系统为例，针对导航战背景下如何保持我国领土及周边区域导航服务能力的问题进行了研究，提出了一种基于混合星座和最优 GDOP 值准则的卫星导航系统功率增强方案，并就不同实现方式对功率增强覆盖区域导航服务性能的影响进行了对比分析。分析结果表明，采用“5GEO + 4MEO”的功率增强组合形式，可以实现对我国领土及近海区域的全天时覆盖，可用性水平达到 100% (GDOP < 6.3)，同时保证重点区域的 GDOP 值小于 2.5。此外，这种组合形式在实现复杂度和保持功率增强覆盖区导航服务性能稳定性方面具有明显的优势，可有效提高战时系统的生存能力。因此，“5GEO + 4MEO”的功率增强组合形式可以作为我国 Compass 系统实施区域功率增强的一种备选方案。另外，适当增加 MEO 功率增强卫星的数量可以进一步提高功率增强信号覆盖区域的服务性能。

表 2　不同 MEO 功率增强卫星数量条件下的服务性能

Tab. 2　The server performance in different number of power-enhanced MEO satellite

MEO 卫星个数	1	2	3	4	5	6	7
战区中心 GDOP 均值	3.61	2.37	2.07	1.89	1.78	1.71	1.67
战区中心 GDOP 方差	0.03	0.14	0.12	0.12	0.13	0.14	0.15
覆盖区域占全球区域百分比/%	12.1	12.8	15.7	20.2	23.8	26.2	36.9
可用性水平取值(0.9,1]区域占全球区域百分比/%	7.9	8.6	9.8	11.1	16.0	18.5	23.1

(下转第 101 页)

[16] Mishra A, Banerjee S, Arbaugh W. Weighted coloring based channel assignment for WLANs[J]. SIGMOBILE Mobile Computer Communication Review, 2005, 9(7):19 – 31.

[17] Shin M, Lee S, Kim Y. Distributed channel assignment for multi-radio wireless networks[C]//Proc of Mobile Adhoc and Sensor Systems (MASS'06), IEEE, 2006:417 – 426.

[18] Halldorsson M M, Halpern J Y, Li L E, et al. On spectrum sharing games [C] //Proc of the 23rd Annual ACM Symposium on Principles of Distributed Computing, Ser. PODC '04, Newfoundland, Canada: ACM, 2004: 107 – 114.

[19] Yu Q, Chen J, Fan Y, et al. Multi-channel assignment in wireless sensor networks: A game theoretic approach[C] // Proc of INFOCOM'10, San Diego, CA:IEEE, 2010:1 – 9.

[20] Xiao J, Xiong N, Yang L T, et al. A joint selfish routing and channel assignment game in wireless mesh networks [J]. Computer Communication, 2008, 31(5):1447 – 1459.

[21] Vallam R, Kanagasabapathy A, Murthy C. A non-cooperative game-theoretic approach to channel assignment in multi-channel multi-radio wireless networks [J]. Wireless Networks, 2011, 17:411 – 435.

[22] Cheng H, Yang S. Joint multicast routing and channel assignment in multiradio multichannel wireless mesh networks using tabu search[C] //Proc of ICNC'09, 2009, 4:325 – 330.

[23] Hui C, Yu S X. Joint QoS multicast routing and channel assignment in multiradio multichannel wireless mesh networks using intelligent computational methods[J]. Applied Soft Computing, 2011, 11(2):1953 – 1964.

[24] Raniwala A, Gopalan K, Chiueh T C. Centralized channel assignment and routing algorithms for multi-channel wireless mesh networks [J]. SIGMOBILE Mobile Computing Communication Review, 2004, 8(4):50 – 65.

[25] Bakhshi B, Khorsandi S, Capone A. On-line joint QoS routing and channel assignment in multi-channel multi-radio wireless mesh networks [J]. Computer Communications, 2011, 34(11):1342 – 1360.

[26] Dhananjay A, Zhang H, Li J, et al. Practical distributed channel assignment and routing in dual-radio mesh networks[C] // Proc of the SIGCOMM'09, Barcelona, Spain:ACM, 2009:99 – 110.

[27] Chiu H S, Yeung K, Lui K S. J-CAR: an efficient joint channel assignment and routing protocol for IEEE 802.11-based multi-channel multi-interface mobile ad hoc networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(4):1706 – 1715.

[28] Gao L, Wang X. A game approach for multi-channel allocation in multi-hop wireless networks[C] //Proc of the 9th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing, Ser. (MobiHoc '08), Hong Kong, China:ACM, 2008:303 – 312.

[29] Blough D, Resta G, Santi P. Approximation algorithms for wireless link scheduling with SINR-based interference[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking (TON), 2010, 18(6):1701 – 1712.

[30] Orfanidis S J. Electromagnetic waves and antennas[M]. New Jersey: Piscataway, 2004.

[31] MacKenzie A, DaSilva L. Game theory for wireless engineers[M]. Morgan & Claypool publisher, 2006.

(上接第 80 页)

参考文献(References)

[1] Filler R, Ganop S, Olson P, et al. Positioning, navigation and timing: the foundation of command and control[R]. US Army Command and Control Directorate (C2D), Fort Monmouth, 2004.

[2] 孙进, 初海彬, 董海青,等. 导航卫星系统功率增强技术与覆盖范围研究[J]. 测绘学报, 2011, 40:80 – 84.
SUN Jin, CHU Haibin, DONG Haiqing, et al. Research on power-enhanced technology and coverage areas of global navigation satellites [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2011, 40:80 – 84. (in Chinese)

[3] 谭述森. 北斗卫星导航系统的发展与思考[J]. 宇航学报, 2008, 29:391 – 396.
TAN Shusen. Development and thought of compass navigation satellite system[J]. Journal of Astronautics, 2008, 29:391 – 396. (in Chinese)

[4] 杨鑫春, 李征航, 吴云. 北斗卫星导航系统的星座及 XPL 性能分析[J]. 测绘学报, 2011, 40:68 – 72.
YANG Xinchun, LI Zhenghang, WU Yun. The performance analysis of constellation and XPL for compass [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2011, 40:68 – 72. (in Chinese)

[5] 谭述森. 卫星导航定位工程[M]. 2 版. 北京:国防工业出版社, 2010.
TAN Shusen. The Engineering of satellite navigation and positioning [M]. 2nd ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2010. (in Chinese)

[6] Kaplan E D, Hegarty C J. Understanding GPS: principles and applications [M]. 2nd ed. Norwood: Artech House Inc., 2006

[7] 彭竞, 聂俊伟, 王飞雪. 关闭部分导航信号实现区域定位阻断对全球定位性能的影响分析[J]. 中国科学:物理学力学 天文学, 2011, 41(5):547 – 555.
PENG jing, NIE Junwei, WANG Feixue. An analysis of the performance of global positioning service affected by partially turning off navigation signals for preventing positioning in local area[J]. Scientia Sinica: Phys, Mech & Astron, 2011, 41(5):547 – 555. (in Chinese)