

文章编号: 1001-1595(2011)S-0080-05

导航卫星系统功率增强技术与覆盖范围研究

孙 进¹, 初海彬¹, 董海青¹, 秦红磊², 陈忠贵¹

1. 中国空间技术研究院, 北京 100094; 2. 北京航空航天大学, 北京 100083

Research on Power-enhanced Technology and Coverage Areas of Global Navigation Satellites

SUN Jin¹, CHU Haibin¹, DONG Haiqing¹, QIN Honglei², CHEN Zhonggui¹

1. China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China; 2. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China

Abstract: Based on in-depth research of power-enhancement of domestic and international navigation satellites, the coverage areas of GEO satellites' antenna beam under different angles of elevation are analyzed. On the basis of analysis and demonstration of power-enhanced technology and program, this paper mainly discussed the power-enhanced signal's coverage areas of our global navigation satellite. It gave out simulations of ground receiving power and antenna beam coverage, under different power-enhancement requirements of 10 dB, 15 dB, 20 dB, 25 dB. It gave out constraints of power-enhanced requirements to navigation satellites. It compared Chinese global navigation satellites to GPS (GPS) at ground receiving signal, coverage areas of power-enhanced, achievement difficulty of power-enhancement, Doppler collision problem.

Key words: navigation satellites; power-enhancement; coverage area; GEO

摘 要: 基于国内外导航卫星功率增强设计的研究, 在系统层面上仿真分析我国导航卫星系统中的 GEO 卫星在不同的仰角下天线波束的地面覆盖区域。在对功率增强技术分析的基础上, 着重研究我国导航卫星系统的功率增强信号的覆盖范围, 给出 10 dB、15 dB、20 dB、25 dB 不同功率增强要求下, 地面接收功率、天线波束覆盖范围的仿真分析, 提出功率增强要求对于卫星的约束条件。并从地面接收信号强度、功率增强的覆盖范围、功率增强技术的实现难度、导航卫星系统的多普勒碰撞问题方面进行的我国导航卫星系统与 GPS (GPS) 系统性能对比。

关键词: 导航卫星; 功率增强; 覆盖范围; 地球静止轨道

中图分类号: P228

文献标识码: A

1 引言

随着全球范围内 GPS、Galileo 等导航卫星系统的发展, 功率增强技术已经成为导航卫星有效载荷的一项关键技术, 具有重要应用。导航卫星的功率增强能力与天线的覆盖范围、地面接收信号强度及整星的功率分配等关系密切, 以 GPS 系统的参数为参考, 通过理论分析与仿真, 对功率增强能力与地面接收功率图进行仿真分析, 给出我国导航卫星系统与 GPS (GPS) 系统的性能对比。

号。接收机收到更多的信号可以改善定位精度, 但是本质上不会明显提高接收机的抗干扰能力。功率增强技术实施的基本要求是在特定区域同时有至少 4 颗卫星播发功率增强信号。

对于我国的导航卫星系统, 从实际需求考虑, 功率增强区域应该在中国本土附近, GEO 卫星恰好固定在这片区域上空。GEO 卫星 0° 仰角覆盖图如图 1 所示。

2 导航卫星系统功率增强技术分析

美国 GPS (GPS) 系统中功率增强的实施目标^[1]是在特定范围内播发比正常信号能量高约 20 dB 的军用 M 码信号^[1]。美国的 GPS (GPS) 计划中, 有 16 颗卫星播发功率增强信号, 使得全球绝大部分地区可以接收到至少 4 颗卫星播发的功率增强信

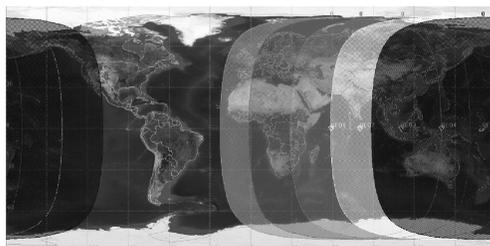


图 1 GEO 卫星 0° 仰角覆盖图

Fig. 1 Coverage area of GEO satellite at the elevation of 0°

从图 1 可以看出, 中国的领土和领海的大部分地区均在 GEO 卫星覆盖范围之内。

考虑到接收机通常可以处理的卫星仰角为 5° , 图 2 和图 3 分别是 5° 仰角和 15° 仰角的地球卫星覆盖图。

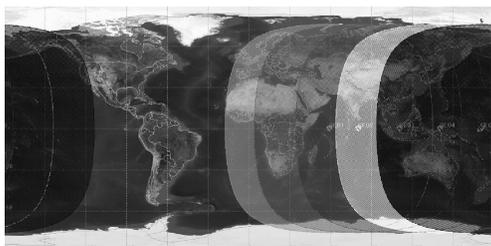


图 2 GEO 卫星 5° 仰角覆盖图

Fig. 2 Coverage area of GEO satellite at the elevation of 5°

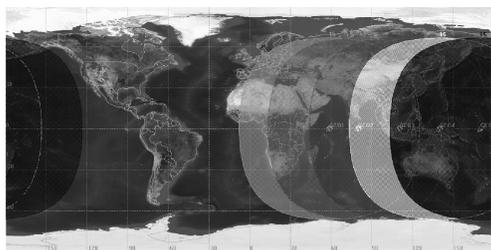


图 3 GEO 卫星 15° 仰角覆盖图

Fig. 3 Coverage area of GEO satellite at the elevation of 15°

从图中可以看出, 在卫星仰角 5° 的情况下中国周围的敏感地区仍能接收到 GEO 卫星的信号; 卫星仰角为 15° 时, 我国的领海可以覆盖到, 只有东北的非完全开阔地区功率增强的实施可能会受到遮挡的影响。

由于 GEO 卫星的轨道高度远高于 MEO 卫星^[2], 因此同样的天线发射功率相同的信号, 到达地面的信号功率也不相同。GEO 卫星的轨道高度为 35 786 km, GPS 的 MEO 卫星的轨道高度为 20 200 km, 因此相同的信号到达地面后, 我国卫星导航系统与 GPS 系统接收功率之比为 $\left(\frac{20\ 200}{35\ 786}\right)^2 \approx 0.3186$, 折合成 dB 形式, 即我国卫星导航系统比 GPS 地面接收功率小 5 dB。

由于 GEO 卫星相对于地球静止于赤道上空, 只能对处于卫星正下方的赤道地区播发功率增强信号。因此如果使用 GEO 卫星播发功率增强信号, 需要对卫星姿态进行调整。当 GEO 卫星的姿态改变时, 不能播发正常信号。因此, 使用

GEO 卫星播发功率增强信号时, 只能停止播发正常信号。这与 GPS ④的功率增强信号播发模式不同。

3 我国导航卫星系统功率增强信号覆盖范围分析

卫星波束夹角 β 、地面接收机仰角 α 以及接收机与垂直入射点间的距离 d 的关系见如图 4^[3]。

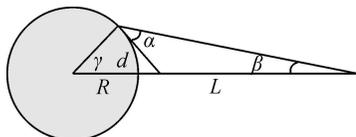


图 4 卫星与地球的空间几何关系

Fig. 4 Spatial relation of satellite and Earth

$$\gamma = 90^\circ - \arccos\left(\frac{L+R}{R}\sin\beta\right) - \beta \quad (1)$$

$$\gamma = 90^\circ - \alpha - \arcsin\left(\frac{R}{L+R}\cos\alpha\right) \quad (2)$$

$$d = 2\pi R \frac{\gamma}{360^\circ} \quad (3)$$

接收机到信号垂直入射点的距离 d 与卫星仰角 α 的关系^[4]

$$d = 2\pi R \frac{90^\circ - \alpha - \arcsin\left(\frac{R}{L+R}\cos\alpha\right)}{360^\circ} \quad (4)$$

式中, 地球半径 $R = 6\ 371\ \text{km}$ 。对于我国导航卫星系统的 MEO 卫星, 当 $\alpha = 0^\circ$ 时, $\beta = 13.214^\circ$ 。我国的 MEO 卫星信号覆盖半径略大于 GPS 卫星信号的覆盖半径 8 462 km, 对于我国导航卫星系统中的 GEO 卫星, 当 $\alpha = 0^\circ$ 时, $\beta = 8.7^\circ$ 。

3.1 功率增强的卫星选择

我国的 MEO 卫星和 GPS 系统的主要区别在于轨道略高, 导致信号的传播距离增加, 信号的路径衰减增加了 0.5 dB。如果我国仿照 GPS ④的功率增强计划用 MEO 卫星实施功率增强^[5], 由于 MEO 卫星轨道较高, 在相同的发射信号功率下, 地面接收信号能量较 GPS ④低 0.5 dB。

导航卫星星座中的 IGSO 卫星因其轨道特点无法保证在我国上空实时可见^[6], 因此, 从卫星信号波束的覆盖区域来看, 采用导航卫星系统中的 GEO 卫星播发功率增强信号是合适的选择。

在卫星的总发射功率不变的情况下, 卫星信号的覆盖区域随着信号能量的增强而减小。因此, 功率增强信号的能量和覆盖范围是矛盾的, 在方案设计中, 需要对两者进行有效折中。

图5~图8仿真结果是以GPS的基准地面接收功率-158.5 dBW作为参考,分别仿真功率增强10 dB、15 dB、20 dB、25 dB的地面接收功率。GEO卫星视界中对应地球的夹角 $\beta = 8.7^\circ$, GEO卫星天线主瓣(天线方向增益大于0 dB)对应地球的夹角 $\beta = 8.7^\circ \times (20^\circ / 13.9^\circ) = 12.5^\circ$ 。

3.2 功率增强10 dB分析

播发信号能量提高10 dB后,其最大覆盖范围的边缘距离信号直接入射点为1609 km,对应的地球夹角

$$\gamma = \frac{90^\circ - 8.7^\circ}{5.62^\circ} = 14.47^\circ \quad (5)$$

$$\alpha + \arcsin\left[\frac{R}{L+R} \cos \alpha\right] = 90^\circ - 14.47^\circ \quad (6)$$

式中,地球赤道半径 $R = 6378$ km; GEO卫星轨道高度 $L = 35786$ km。解得 $\alpha = 73.0^\circ$, $\beta = 2.53^\circ$ 。

$$\left. \begin{aligned} \alpha' &= \arccos\left[\frac{L+R}{R} \sin \beta\right] = 65.2^\circ \\ \beta &= \beta \times \frac{20^\circ}{13.9^\circ} = 3.64^\circ \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

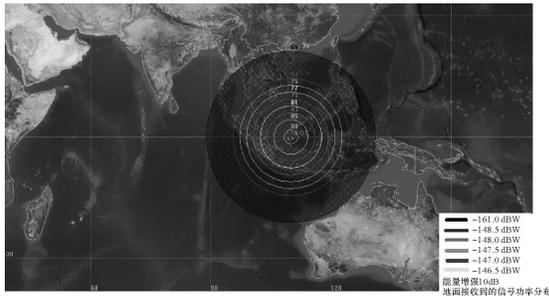


图5 功率增强10 dB地面接收功率分布图

Fig. 5 Distribution of ground-receiving power at the power enhancement of 10 dB

3.3 功率增强15 dB分析

播发信号能量提高15 dB后,其最大覆盖范围的边缘距离信号直接入射点为905 km,对应的地球夹角

$$\gamma = \frac{90^\circ - 8.7^\circ}{10^\circ} = 8.13^\circ \quad (8)$$

$$\alpha + \arcsin\left[\frac{R}{L+R} \cos \alpha\right] = 90^\circ - 8.13^\circ \quad (9)$$

式中,地球赤道半径 $R = 6378$ km; GEO卫星轨道高度 $L = 35786$ km。解得 $\alpha = 80.43^\circ$, $\beta = 1.44^\circ$ 。

$$\left. \begin{aligned} \alpha' &= \arccos\left[\frac{L+R}{R} \sin \beta\right] = 76.2^\circ \\ \beta &= \beta \times \frac{20^\circ}{13.9^\circ} = 2.07^\circ \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

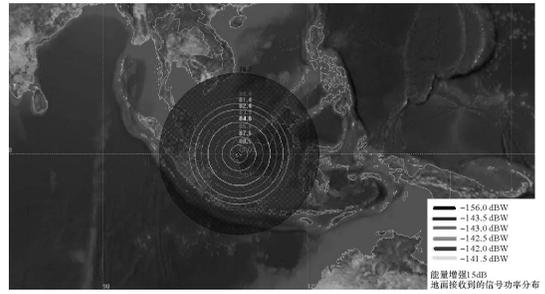


图6 功率增强15 dB地面接收功率分布图

Fig. 6 Distribution of ground-receiving power at the power enhancement of 15 dB

3.4 功率增强20 dB分析

播发信号能量提高20 dB后,其最大覆盖范围的边缘距离信号直接入射点为509 km,对应的地球夹角

$$\gamma = \frac{90^\circ - 8.7^\circ}{17.78^\circ} = 4.57^\circ \quad (11)$$

$$\alpha + \arcsin\left[\frac{R}{L+R} \cos \alpha\right] = 90^\circ - 4.57^\circ \quad (12)$$

式中,地球赤道半径 $R = 6378$ km; GEO卫星轨道高度 $L = 35786$ km。解得 $\alpha = 84.62^\circ$, $\beta = 0.81^\circ$ 。

$$\left. \begin{aligned} \alpha' &= \arccos\left[\frac{L+R}{R} \sin \beta\right] = 82.24^\circ \\ \beta &= \beta \times \frac{20^\circ}{13.9^\circ} = 1.17^\circ \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

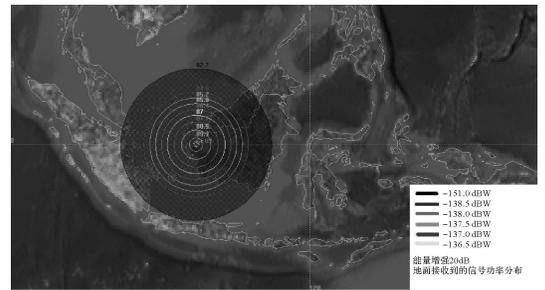


图7 功率增强20 dB地面接收功率分布图

Fig. 7 Distribution of ground-receiving power at the power enhancement of 20 dB

3.5 功率增强25 dB分析

播发信号能量提高25 dB后,其最大覆盖范围的边缘距离信号直接入射点为286 km,对应的地球夹角

$$\gamma = \frac{90^\circ - 8.7^\circ}{31.62^\circ} = 2.57^\circ \quad (14)$$

$$\alpha + \arcsin\left[\frac{R}{L+R} \cos \alpha\right] = 90^\circ - 2.57^\circ \quad (15)$$

式中,地球赤道半径 $R = 6378$ km, GEO卫星轨道

高度 $L = 35\,786\text{ km}$ 。解得 $\alpha = 86.97^\circ, \beta = 0.46^\circ$ 。

$$\left. \begin{aligned} \alpha' &= \arccos\left[\frac{L+R}{R}\sin\beta\right] = 85.62^\circ \\ \beta &= \beta \times \frac{20^\circ}{13.9^\circ} = 0.66^\circ \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

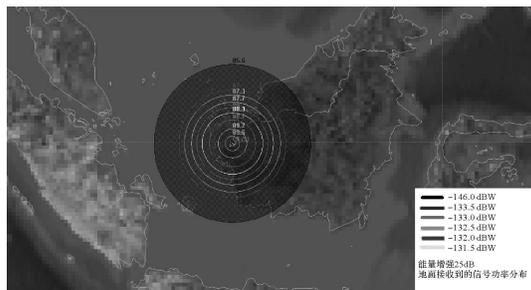


图8 功率增强 25 dB 地面接收功率分布

Fig. 8 Distribution of ground receiving power at the power-enhancement 25 dB

3.6 综合分析

综合上述,当功率增强 25 dB 时,地面有效信号覆盖区域半径下降至 300 km 以下,参照 GPS 功率增强覆盖半径 300 km,其实用性受到一定影响。因此,功率增强 25 dB 即为功率增强的合理上界。

4 我国卫星导航系统与 GPS 功率增强性能对比

4.1 地面接收信号强度

由于 GEO 卫星的轨道高度高于 MEO 卫星,传播距离长,空间衰减大。如果信号发射功率相同,我国卫星导航系统比 GPS 地面接收信号强度约低 5 dB^[7];北斗系统功率增强技术实施效果与纬度有关,而 GPS 系统的点波束播发效果和纬度关系不大。

4.2 功率增强的覆盖区域

北斗系统的 GEO 卫星静止于赤道上空,只能为中国及部分亚太地区提供功率增强服务;GPS 系统的 MEO 卫星都可以实施功率增强技术,可以为全球任何地区提供功率增强服务。

4.3 功率增强的技术实现难度

北斗系统的功率增强技术涉及的 GEO 卫星,相对于 GPS 系统涉及的 MEO 卫星数量少、工程量较小、建成后的控制策略也相对简单。

4.4 导航卫星系统的多普勒碰撞问题

北斗系统中 GEO 卫星播发功率增强信号,会带来一个 GPS 系统所不会出现的问题:由于 GEO 卫星相对地球静止,多普勒频移基本相同,

导致码间干扰的影响增大。同一格式信号间干扰主要受相对多普勒频差、伪码互相关性能、干扰信号强度等影响,下面建立相同信号间干扰的理论模型,分析干扰的性质和其对码跟踪精度的影响。接收到的信号表示为

$$s(t) = D_0(t)C_0(t)\exp\{j[2\pi f_0 t + \varphi_0]\} + \sum_{i=1}^N a_i D_i(t + \delta_i) C_i(t + \delta_i) \exp\{j[2\pi(f_0 + f_{di})t + \varphi_i]\} \quad (17)$$

式中,第一项表示有用信号分量;第二项表示来自其他 N 颗卫星的干扰信号分量。 a_i 为干扰信号相对有用信号强度; f_{di} 为干扰信号相对有用信号多普勒频差。若有用信号的载波频率被正确跟踪,第 k 次相关器输出为

$$R_k(\tau) = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} s(t)C_0(t-\tau)\exp\{-j2\pi f_0 t\} dt = \pm \exp\{j\varphi_0\} R_s(\tau) + \sum_{i=1}^N \pm a_i \exp\{j\varphi_i + k2\pi f_{di} T\} R_{ci}(\tau) Sa(\pi f_{di} T) \quad (18)$$

式中, T 为预积分时间; $R_s(\tau)$ 为扩频码自相关函数; $R_{ci}(\tau)$ 为扩频码互相关函数。利用式(18),可分析相同格式信号间干扰的性质:

- (1) 当相对多普勒频差大于预积分时间的倒数时,干扰信号会被相干积分器平滑;
- (2) 当相对多普勒频差大于码环路滤波器带宽时,干扰信号在相关器的输出结果会被环路滤波器平滑;
- (3) 当相对多普勒频差小于码环路滤波器带宽时(多普勒碰撞),干扰信号会在相关器输出产生类似多径干扰的固定偏差,对伪码跟踪精度产生较大影响。

多普勒碰撞现象在信号能量相同^[8]、多普勒频率相同的两颗卫星上最明显,因此距离两颗 GEO 卫星相等的地区多普勒碰撞现象最严重。随着 GEO 卫星稳定性的提高,其位置保持的精度会越来越高,多普勒变化会更小,多普勒碰撞的效果会更明显。

对于我国的 GEO 卫星,导航信号来自于相对静止的信号源,多普勒碰撞会经常发生,这时信号间干扰将成为伪距测量的一个主要误差源。建立干扰信号源模型,干扰信号和有用信号强度相同,相对多普勒频差为 0,则相关器输出为

$$R_k(\tau) = \exp\{j\varphi_0\} R_s(\tau) \pm \exp\{j\varphi_i\} R_{ci}(\tau + \delta_i) \quad (19)$$

可以看出,信号间干扰误差由干扰信号和有用信号的载波相位关系和扩频码互相关函数决定。与前面的多径误差分析一样,当干扰信号和有用信号的载波相位相差为 0° 或 180° 时,干扰误差最大。以GPS的C/A码为例,考察扩频码互相关函数如图9所示。

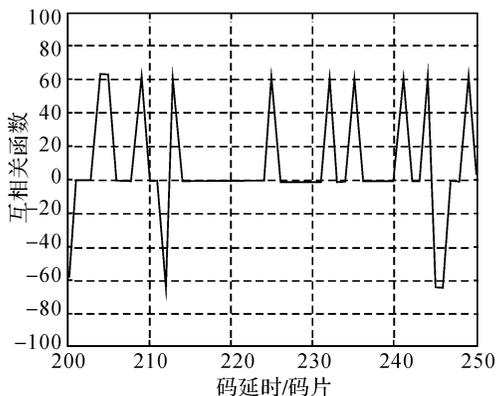


图9 C/A码的互相关函数

Fig. 9 Cross-correlation function of C/A chip

结合图9,总结C/A码的互相关函数的统计特性如下:码时延范围内约 $3/4$ 取值为0,约 $1/8$ 取值为+63,约 $1/8$ 取值为-65。定义自相关函数峰值和互相关函数峰值之比为扩频码的保护增益,则C/A码的保护增益为 $\frac{1023}{65} = 23.9$ dB。

当干扰信号和有用信号互相关函数位于峰值附近时,干扰误差最大。这种干扰对比底噪低1 dB的确定性干扰,没有随机性,并且只有在两个信号频率多普勒完全相同的时候才能达到上述最大值,通常情况下很小,对于GPS系统可以忽略不计。但是对于播发功率增强信号的GEO卫星来说,由于卫星间相对静止,信号的多普勒频率相同,导致互相关产生码间干扰最大值,并且随着信号能量的增加而增加。

5 结论

对比我国的卫星导航系统与GPS系统功率增强性能,受到卫星总发射功率的限制,功率增强信号的能量强度和覆盖范围不可兼得,应根据实际需求,选择合适的信号能量强度和覆盖范围。

根据3.2、3.3、3.4、4.5节的分析,以卫星天线发射功率27 W为例进行计算(参照GPS L1 C/A的总发射功率):

能量增强10 dB(-148.5 dBW),功率增强的

最大覆盖范围半径为1609 km;

能量增强15 dB(-143.5 dBW),功率增强最大覆盖范围半径为905 km;

能量增强20 dB(-138.5 dBW),功率增强最大覆盖范围半径为509 km;

能量增强25 dB(-133.5 dBW),功率增强最大覆盖范围半径为286 km;

从上述计算结果可以得出,当我国卫星导航系统的发射功率增强25 dB时,其最大覆盖半径已经小于300 km。根据GPS计划给出的指标,功率增强信号有效区域半径为300 km。因此,增强功率的上界为25 dB,即达到-133.5 dBW。如果卫星导航系统可以发射更大的信号功率,功率增强的幅度和覆盖范围还可以进一步提升。

参考文献:

- [1] KAPLAN E D, HEGARTY C J. Understanding GPS: Principles and Applications[M]. Norwood: Artech House, 2005.
- [2] GAO G X, CHEN A, LORENZO D D, et al. The Compass MEO Satellite Codes[J]. Inside GNSS, 2007, 2(5): 36-42.
- [3] BETZ J W. Effect of Partial Band Interference on Receiver Estimation of C/N0: Theory[C] // Proceedings of the 2001 National Technical Meeting of the Institute of Navigation. Long Beach: ION, 2001.
- [4] BETZ J W. Systems, Signals and Receiver Signal Processing[J]. Navtech GPS, 2006, 3(9): 301-303.
- [5] MISRA P, ENGE P. Global Positioning System: Signals, Measurements, and Performance[M]. Lincoln: Ganga-Jamuna Press, 2006.
- [6] MORRISON A, LACH APPELLE G. Embedded GNSS Receiver Re-acquisition Failure Due to Thermal Variation[C] // Proceedings of ION NTM 2008. San Diego: ION, 2008: 240-247.
- [7] WARD P. GPS Receiver Search Technique[C] // Proceedings of IEEE PLANS1996. Atlanta: IEEE, 1996: 22-26.
- [8] GROVES P D. GPS Signal to Noise Measurement in Weak Signal and High Interference Environments[J]. Navigation, 2005, 52(2): 83-94.

(责任编辑:宋启凡)

收稿日期:2011-01-30

修回日期:2011-03-19

第一作者简介:孙进(1985—),男,硕士,研究方向为卫星导航增强与完好性检测。

First author: SUN Jin(1985—), male, master, majors in satellite navigation system's integrity.

E-mail: Yuqing4071@gmail.com