

Lü Zhicheng, Nie Junwei, Liu Zengjun, Wang Feixue. Effects of enhancing power on received signal quality in satellite navigation system. *Chin. J. Space Sci.*, 2013, **33**(1): 101-107

卫星导航系统功率增强对接收信号质量的影响分析

吕志成 聂俊伟 刘增军 王飞雪

(国防科学技术大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

摘要 GPS 现代化计划在 L1 和 L2 两个频点上增加具有波束增强功能的 M 码导航信号. 以 GPS L1 M 码信号为例, 从频谱重叠、接收信号等效载噪比两方面分析 GPS L1 M 码信号功率增强对其他导航信号质量的影响. 分析结果表明, GPS L1 M 码信号增强幅度在 20 dB 以内时, 可以明显提升增强信号的抗干扰性能, 引起其他信号等效载噪比恶化量小于 2 dB; 信号增强幅度超过 20 dB 后, 将导致其他信号质量迅速下降, 功率增强信号等效载噪比达到某一极值后将不再增加.

关键词 GPS, 导航, 功率增强, 抗干扰

中图分类号 V 44

Effects of Enhancing Power on Received Signal Quality in Satellite Navigation System

LÜ Zhicheng NIE Junwei LIU Zengjun WANG Feixue

(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073)

Abstract The GPS modernization program plans to add M-code navigation signals which have the feature of beam power enhancement in the frequencies of L1 and L2. Taking GPS L1 M-code signal as example, the received signal quality, affected by power-enhanced signal from the aspects of spectral overlap as well as equivalent carrier-to-noise ratio of the received signals, is analyzed. Simulation results show that when GPS L1 M-code signal enhancement is within the range of 20 dB, the anti-jamming performance of power-enhanced signal will be improved significantly and the equivalent carrier-to-noise ratio of non-power-enhanced signal drops less than 2 dB. When the signal enhancement range surpasses 20 dB, the quality of non-power-enhanced signal will drop rapidly attributing to the interference from power-enhanced signal. While, when keep on increasing the signal power, the value of equivalent carrier-to-noise ratio of power-enhanced signal will no longer increase after having reached certain extreme value.

Key words GPS, Navigation, Power enhancement, Anti-jamming

2011-09-15 收到原稿, 2011-12-23 收到修定稿

E-mail: chifeng21@163.com

0 引言

为提高 GPS 系统在未来导航环境中的生存能力, 实现保护、阻止和保持的功能, GPS 现代化计划重新设计了编码信号即 M 码, 用来取代 P(Y) 码^[1]. 新的 M 码采用 BOC 方式调制到 L1 和 L2 两个载波上, 具有与普通信号频谱分离、跟踪和捕获性能增强等特点, 使信号的安全性和灵活性得到提升. M 码信号将在 Block IIR-M 及其后续卫星上实现覆盖全球的广播, 预期到达地球表面的 M 码信号最低功率电平约为 -158 dBW . 此外, GPS 现代化还计划在 Block III 及其后续卫星上, 增加具有点波束增强功能的 M 码信号, 使得在有限的地理区域内, M 码信号最低接收功率电平达到 -138 dBW , 进一步提高了信号的抗干扰能力^[2].

增强卫星信号功率是从根本上提升下行导航信号抗干扰能力的有力措施. 但是, 功率增强信号对于同频段内其他导航信号来说将被视为干扰信号, 不可避免会对其他信号产生影响. 在 1575.42 MHz 频段内集中有 GPS, Galileo 和 Compass 等卫星导航系统的多个授权信号 (见表 1^[2-4]), 增强 GPS L1 M 码信号功率势必会影响其他导航信号的接收质量. 本文以 GPS L1 M 码信号为例, 分析 M 码信号功率增强的效果以及对同频段内其他导航信号的影响.

1 接收信号质量评估

1.1 等效载噪比和抗干扰品质因数

信号捕获、载波跟踪和数据解调的性能均取决于接收机中相关器输出端的 SNIR 值. 在存在干扰的情况下, 准确计算 GNSS 接收机相关器输出端的 SNIR 值是非常复杂的, 一般采用等效载噪比的形式来衡量所接收信号的质量. 等效载噪比 $(C_S/N_0)_{\text{eff}}$ 的定义为^[2]:

$$(C_S/N_0)_{\text{eff}} = \frac{1}{\frac{1}{C_S/N_0} + \frac{C_J/C_S}{QR_c}} \quad (1)$$

其中, C_S/N_0 表示接收信号在无干扰情况下的载噪比; C_J/C_S 表示接收机内干扰与接收信号功率的比值; R_c 为扩频码速率; Q 为由于干扰源和信号类型所

确定的抗干扰品质因数, 定义为

$$Q = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} |H_R(f)|^2 S_S(f) df}{R_c \int_{-\infty}^{+\infty} |H_R(f)|^2 S_J(f) S_S(f) df} \quad (2)$$

其中, $S_S(f)$ 为归一化为无穷带宽上的信号功率谱密度; $S_J(f)$ 为归一化为无穷带宽上的总干扰功率谱密度; $H_R(f)$ 为接收机滤波器的传输函数. 由式 (1) 可以看到, 在相同的干扰强度下, Q 值越大, 说明干扰对信号的影响越小.

1.2 频谱重叠分析

在以 1575.42 MHz 为中心的频段范围内, 集中了 GPS-P (Y), GPS-M, Compass B1 和 Galileo E1 四种具有不同调制方式的导航信号. 其中, 除 GPS-P (Y) 码信号采用 BPSK 调制外, 其他三种信号均采用 BOC 调制^[5]. 图 1 给出了四种导航信号的频谱分布情况, 从图 1 中可以看到, 采用 BOC 调制方式使得四种导航信号功率谱主瓣相互分离, 第一副瓣比主瓣低约 $7\sim 13\text{ dB}$, 信号大部分能量主要集中在主瓣范围内, 这样的设计实现了有限频率资源的复用, 增强了信号控制的灵活性, 播发正常信号时不会对其他系统造成有害干扰. 同时, 不同信号功率谱之间也存在不同程度的重叠, 当某一信号功率显著增强时, 不可避免地会对其他系统的正常工作造成影响.

表 2 列出了 1575.42 MHz 频段四种卫星导航信号的能量分布情况及相互间的抗干扰品质因数. 分

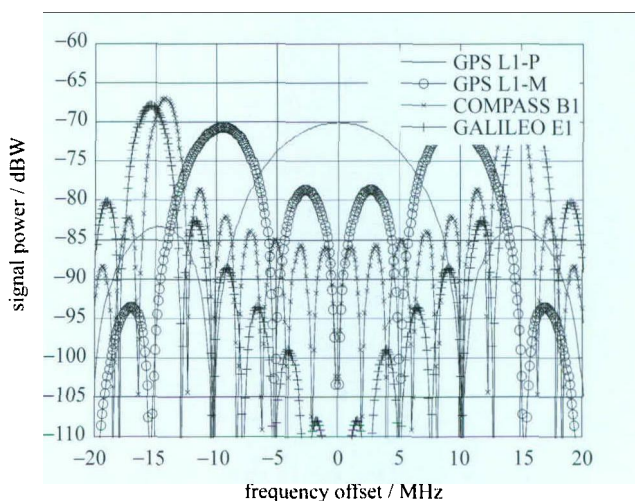


图 1 1575.42 MHz 频段卫星导航信号频谱分布

Fig. 1 Spectrum distribution of satellite navigation signal in 1575.42 MHz frequency band

表 1 1575.42 MHz 频段卫星导航信号特征参数

Table 1 Characteristic parameter of satellite navigation signal in 1575.42 MHz frequency band

导航系统	导航信号	载波频率/(MHz)	码速率/(Mbit·s ⁻¹)	调制方式
GPS	L1-M	1575.42	5.115	BOCs(10,5)
	L1-P(Y)		10.23	BPSK (10)
Galileo	E1	1575.42	2.5 × 1.023	BOCc (15,2.5)
Compass	B1	1575.42	2.046	BOCs (14, 2)

表 2 1575.42 MHz 频段卫星导航信号功率谱主瓣能量分布 (P) 及抗干扰品质因数 (Q)

Table 2 Energy distribution in main lobe of power spectrum (P) and anti-interference quality factor (Q) of satellite navigation signal in 1575.42 MHz frequency band

	GPS L1 P(Y)		GPS L1 M		COMPASS B1		GALILEO E1	
	P/(%)	Q	P/(%)	Q	P/(%)	Q	P/(%)	Q
GPS L1 P(Y)	91.0	1.5	21.9	11.9	3.3	21.4	3.8	30.6
GPS L1 M	56.8	23.4	78.2	3.9	5.7	33.7	2.6	126.3
COMPASS B1	4.0	103.7	58.4	83.2	76.4	4.3	76.5	8.1
GALILEO E1	0.5	117.0	16.6	245.7	64.8	6.4	77.2	4.3

析结果表明, 四种导航信号的主瓣能量占总能量的百分比均大于 75%, GPS L1 P(Y) 码主瓣能量占到总能量的 91%; GPS L1 P(Y) 码信号和 GPS L1 M 码信号能量落入 Compass B1 和 Galileo E1 主瓣区域的能量较小, 分别为 3.3%, 3.8% 和 5.7% 和 2.6%; GPS L1 M 信号的主瓣在 GPS L1 P(Y) 信号的主瓣和第一副瓣之间, 重叠部分能量约占总能量的 56.8% 和 21.9%; Compass B1 和 Galileo E1 主瓣中心频率距 GPS L1 P(Y) 主瓣中心频率较远, 相应的混叠功率占总能量的比重分别为 4.0% 和 0.5%; Compass B1 和 Galileo E1 信号主瓣重叠区域较大, 分别占到总能量的 76.4% 和 77.2%。

由式 (2) 可知, 抗干扰品质因数 Q 与信号和干扰的功率谱密度以及信号码率有关。计算结果表明, 相同调制方式的两个信号由于频谱完全重合, Q 值最小; Compass B1 和 Galileo E1 信号主瓣重叠区域较大, 相应的 Q 值也较小; Galileo E1 信号对 GPS L1 M 信号的干扰影响最小。GPS L1 M 对其他信号干扰的影响由大到小依次为 GPS L1 M > GPS L1 P(Y) > Compass B1 > Galileo E1。

2 功率增强信号对接收信号质量的影响

通常, 用户可同时接收到来自不同导航系统的多颗卫星信号。对其中某颗卫星信号而言, 其他卫星信号被视为多址干扰。在信号功率较弱时, 多址干扰的影响可忽略。但在信号功率增强时, 这种影响将不可忽略。目前已有的多址干扰对消技术适用于对信号已完成捕获跟踪的状态, 在无干扰条件下, 这一条件可以满足。但在强干扰条件下, 弱信号的捕获变得困难, 所以其影响无法消除。

2.1 功率增强对系统内信号的影响

系统内干扰是指同一系统中来自不同卫星信号相互之间的干扰。GPS 系统在 L1 频段播发 GPS P 码和 GPS M 码两种导航信号。其中, GPS P 码信号不具备点波束功率增强功能, GPS M 码信号设计为具有点波束功率增强功能, 预计到 2015 年完全实现从 P 码到 M 码的过渡, 2018 年实现高功率 M 码的完全工作能力。因此, 在相当长一段时间内, GPS 将同时具有 P 码、非功率增强 M 码以及功率增强 M

码三种导航信号^[6].

图2和图3给出了在初始载噪比为40 dBHz情况下,不同GPS M码信号功率增强量与接收端GPS P码信号和非功率增强GPS M码信号等效载噪比的对应关系.可以看到,随着GPS M码信号功率的增大,未增强信号的等效载噪比逐渐降低;GPS M码信号功率增强量在20 dB以内时,未增强信号的等效载噪比下降幅度较小,并且不同功率增强卫星数量对应的变化幅度相当;GPS M码信号功率增强量超过20 dB后,未增强信号的等效载噪比迅速下降,并与增强功率成近似线性关系,功率增强卫星个数越

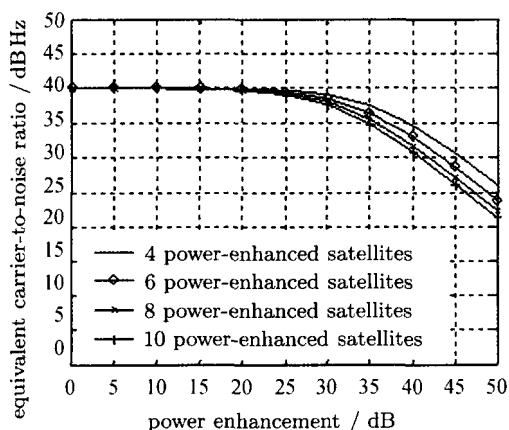


图2 GPS M码信号功率增强对GPS P(Y)码信号的影响

Fig. 2 Effects of GPS M-code signal power enhancement on GPS P(Y)-code signal

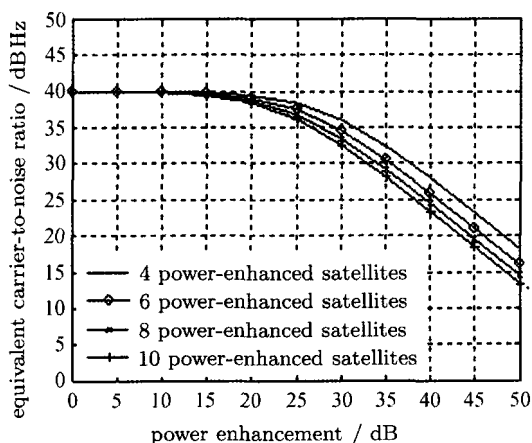


图3 GPS M码信号功率增强对GPS M码非功率增强信号的影响

Fig. 3 Effects of GPS M-code signal power enhancement on GPS M-code non-power-enhanced

多,变化幅度越大;GPS M码信号功率增强对GPS P码信号的影响要小于对未增强GPS M码信号的影响.

图4给出的是在初始载噪比为40 dBHz时,GPS M码信号功率增强对功率增强M码信号的影响,分析结果表明,随着GPS M码信号功率的增大,增强信号的等效载噪比逐渐增加;GPS M码信号功率增强量在20 dB以内时,增强信号的等效载噪比提升量与功率增强的幅度近似成线性关系,信号功率增强可以明显提高接收信号的质量;GPS M码信号功率增强量超过30 dB时,功率增强信号的等效载噪比趋于稳定,继续增加信号功率对提高接收信号的质量提升效果有限;功率增强卫星数量越多,等效载噪比达到的极限值越小.若考虑多系统信号重叠,影响将进一步加剧.

可见,从提升和保持自身系统信号接收质量及实现复杂度的角度出发,GPS M码信号功率增强量控制在20 dB以内是较为理想的选择.

2.2 功率增强对系统间信号的影响

来自不同卫星导航系统信号之间的相互干扰称为系统间干扰.在GPS L1频段内还同时存在Compass B1和Galileo E1两种导航信号,提高GPS L1 M码信号的功率不可避免会对另外两种信号产生影响.图5和图6分别给出了当初始载噪比取值为40 dBHz时,GPS L1 M码信号功率增强量对Compass B1和Galileo E1导航信号质量的影响.从图中可以看

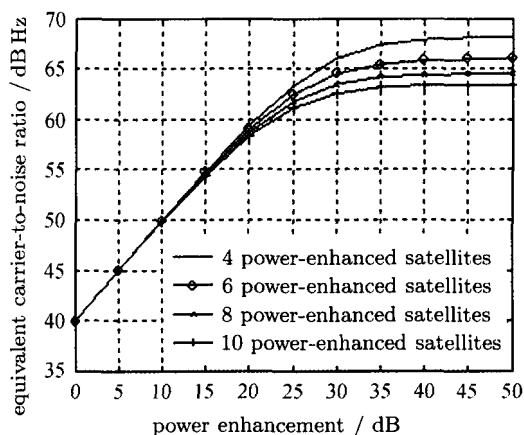


图4 GPS M码信号功率增强对GPS M码功率增强信号的影响

Fig. 4 Effects of GPS M-code signal power enhancement on GPS M-code power-enhanced signal

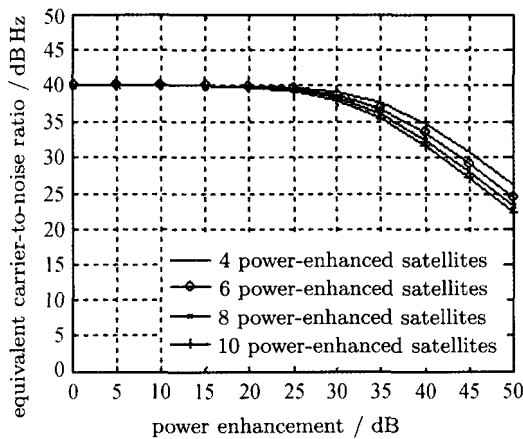


图 5 GPS M 码信号功率增强对 Compass B1 信号的影响
Fig. 5 Effects of GPS M-code signal power enhancement on Compass B1 signal

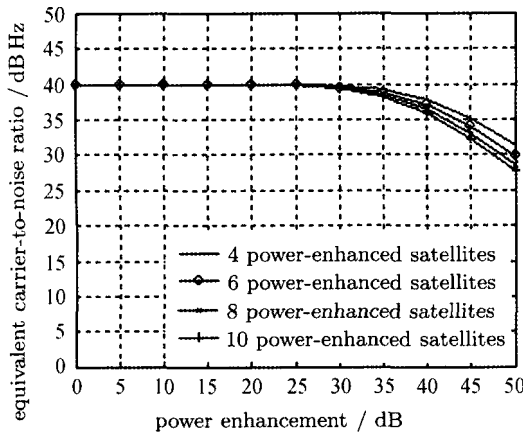


图 6 GPS M 码信号功率增强对 Galileo E1 信号的影响
Fig. 6 Effects of GPS M-code signal power enhancement on Galileo E1 signal

出, GPS M 信号功率增强量超过 20 dB 后, Compass B1 信号的等效载噪比出现明显下降; 功率增强

量超过 30 dB 后, Galileo E1 信号的等效载噪比出现明显下降; Compass B1 信号等效载噪比下降的幅度大于 Galileo E1 信号等效载噪比的下降幅度. 可见, 当 GPS M 码信号功率增强量超过一定幅度后, 将对 Compass B1 信号产生更明显的干扰影响.

表 3 给出了 GPS L1 M 码信号功率增强 20 dB, 不同功率增强卫星数条件下, 同频段各卫星导航信号等效载噪比的数值计算结果. 此时, 功率未增强的信号等效载噪比降低 0~2 dB, 影响较小; 功率增强信号等效载噪比提高 18~20 dB, 抗干扰能力得到大幅度提升.

2.3 干扰情况下功率增强对信号的影响

GPS 现代化提出功率增强的目的是在未来复杂电磁环境条件下, 增加局部地区接收信号的强度, 提高系统抗干扰性能. 实际接收信号的质量与功率增强量、干扰信号强度以及播发功率增强信号的卫星数量有关.

为了简化分析, 固定噪声功率谱密度 $N_0 = -202.7 \text{ dBW} \cdot \text{Hz}^{-1}$, 干扰信号对应的抗干扰品质因数 $Q = 2.3$. 图 7 分别给出了 6 颗和 8 颗卫星播发功率增强信号时, 不同强度干扰信号对功率增强信号的影响. 可以看到, 在干扰信号强度一定时, 增加卫星信号发射功率可以提高接收信号的等效载噪比, 但等效载噪比提高到一定程度后将不再增加, 并且播发功率增强信号的卫星数量越少, 等效载噪比可以达到的极值越大, 这是因为对某一信号来说, 其他卫星的信号都被视为干扰信号, 信号数量越多强度越大意味着干扰影响越严重. 还可以看出, 当外部干扰信号强度较小时, 对接收信号的影响可忽略; 随着外部干扰信号强度的增加, 接收信号的载噪比将出现明显下降, 卫星信号功率增强幅度越大, 引起载噪比下降所需要的外部干扰信号强度越强.

表 3 GPS L1 M 码信号功率增强 20 dB 条件下接收信号等效载噪比 $(C/N_0)_{\text{eff}}$ 数值计算结果 (单位 dBHz)
Table 3 $(C/N_0)_{\text{eff}}$ (dBHz) of received signal under the condition of GPS M-code signal power enhancement 20 dB (unit dBHz)

功率增强卫星数量	GPS L1 P(Y)	GPS L1 M (未增强)	GPS L1 M (增强)	Compass B1	Galileo E1
4	39.9	39.4	59.4 (极值 68.2)	39.9	40.0
6	39.8	39.0	59.0 (极值 66.0)	39.8	40.0
8	39.8	38.7	58.7 (极值 64.5)	39.8	39.9
10	39.7	38.4	58.4 (极值 63.5)	39.8	39.9

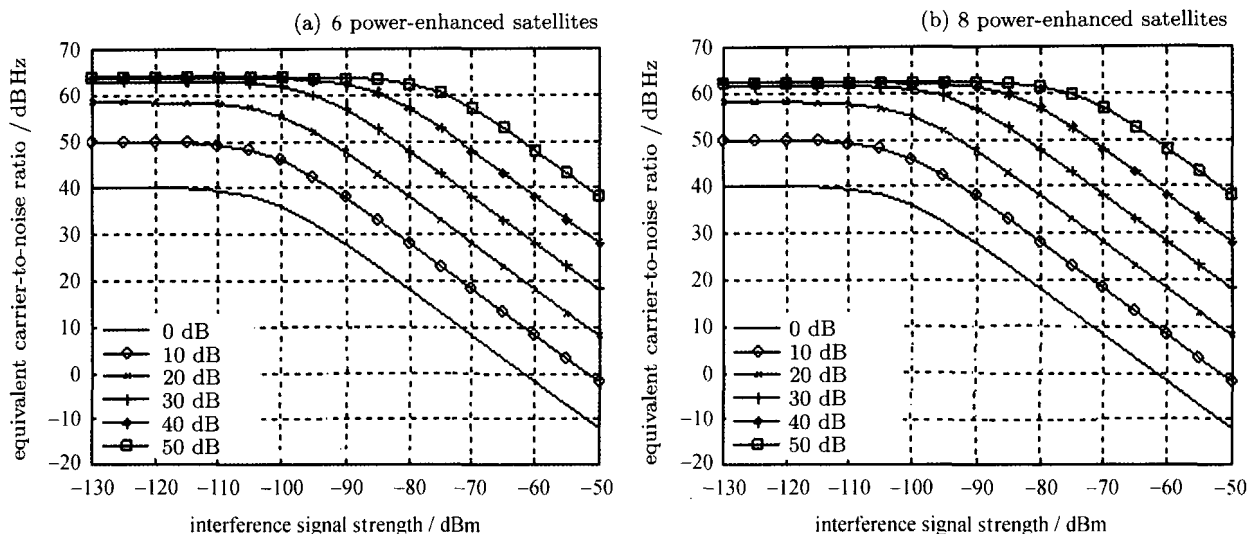


图 7 干扰条件下 GPS M 码信号功率增强对 GPS M 码功率增强信号的影响

Fig. 7 Effects of GPS M-code signal power enhancement on GPS M-code power-enhanced signal in jamming environment

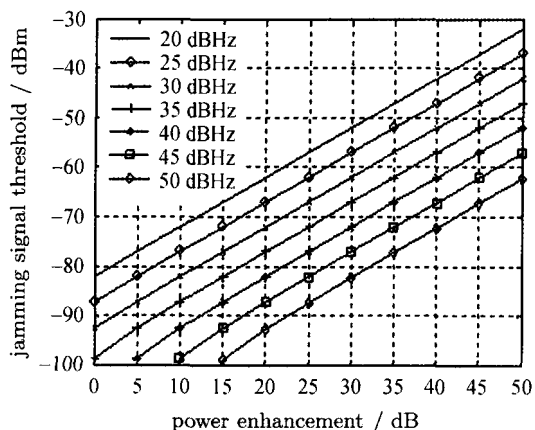


图 8 6 颗功率增强卫星条件下满足特定载噪比时不同功率增强幅度对应的干扰信号容限值

Fig. 8 Relationship between power enhancement scope and jamming signal threshold under 6 power-enhanced satellites in order to meet specific carrier-to-noise ratio

图 8 给出了当同时存在有 6 颗功率增强卫星条件下, 为满足接收信号载噪比的要求, 不同功率增强幅度对应的最大允许干扰信号功率. 从图 8 中可以看到, 在接收信号载噪比要求确定的条件下, 允许的干扰信号最大功率随着功率增强幅度的增大而增大, 即近似成正比关系.

对于 GPS M 码非功率增强信号来说, 外部干扰信号和所有卫星功率增强信号都以干扰的形式引

起接收信号质量的恶化. 图 9 给出的是卫星功率增强信号和外部干扰信号同时存在条件下, GPS M 码非功率增强信号等效载噪比的变化曲线. 不难看出, 提高功率增强幅度、增加功率增强卫星数量和增大干扰信号强度都会使接收信号等效载噪比下降; 卫星信号功率增强量小于 20 dB 且干扰信号强度小于 -110 dB 条件下, 接收信号等效载噪比降低幅度则不超过 3 dB. 干扰信号强度超过 -110 dB, 接收信号等效载噪比随干扰信号强度的增加迅速下降, 接收机必须采取主动抗干扰措施, 例如使用自适应天线阵、采用高性能的抗干扰算法等, 进一步提高其抗干扰能力.

3 结束语

GPS 现代化计划在 L1 和 L2 两个频点上增加具有点波束增强功能的 M 码信号. 以 L1 频段为例, 在未来导航环境中可能同时存在 GPS L1-P、功率未增强 GPS L1-M、功率增强 GPS L1-M、Compass B1 和 Galileo E1 等多个导航信号. 提高 GPS L1 M 信号功率将对同频段其他信号造成不同程度的干扰. 仿真分析结果表明, GPS L1 M 信号增强幅度在 20 dB 以内时, 可以明显提升增强信号的抗干扰性能, 同时引起其他信号等效载噪比恶化量小于 2 dB; 当信号

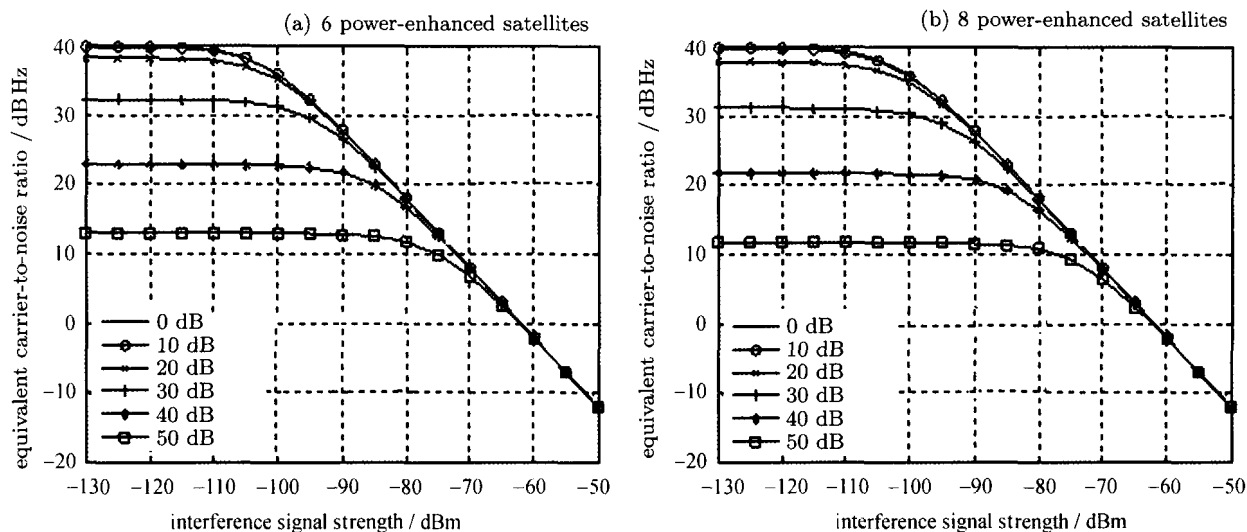


图9 干扰条件下 GPS M 码信号功率增强对 GPS M 码非功率增强信号的影响

Fig. 9 Effects of GPS M-code signal power enhancement on GPS M-code non-power-enhanced signal in jamming environment

增强幅度超过 20 dB 之后, 将导致其他信号质量迅速下降, 功率增强信号等效载噪比达到某一极值后将不再增加。

由此可见, 点波束功率增强技术是提高卫星导航系统抗干扰能力的有效途径之一, 中国 Compass 系统应借鉴并发展点波束功率增强技术, 以应对未来复杂电磁环境以及其他导航系统功率增强信号带来的干扰影响。

参考文献

- [1] Barker B, Betz W J, Clark J. *et al.* Overview of the GPS M code signal [C]//Proceedings of the 2000 National Technical Meeting of The Institute of Navigation. Anaheim, CA: Institute of Navigation, 2000
- [2] Kaplan E D, Hegarty C J. Understanding GPS: Principles

and Applications [M]. 2nd ed. Norwood: Artech House Inc., 2006

- [3] Hein G W, Godet J, Issler J L, *et al.* Status of Galileo signal design and frequency plan [C]//Proceedings of the 15th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation. Portland OR: Institute of Navigation, 2002
- [4] Tan Shusen. The Engineering of Satellite Navigation and Positioning [M]. 2nd ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2010. In Chinese (谭述森. 卫星导航定位工程 [M]. 第二版. 北京: 国防工业出版社, 2010)
- [5] Rebeyrol E, Macabiau C, Lestarquit L, *et al.* BOC power spectrum densities [C]//Proceedings of the 2005 National Technical Meeting of The Institute of Navigation. San Diego CA: Institute of Navigation, 2005
- [6] Filler R, Ganop S, Olson P, *et al.* Positioning, Navigation and Timing: the Foundation of Command and Control [R]. A571564. Fort Monmouth: US Army Command and Control Directorate, 2004