

文章编号: 1001 - 893X(2011)09 - 0044 - 05

Galileo 系统 L1P 与 L1F 信号间干扰的分析*

黄旭方

(广西大学 计算机与电子信息学院, 南宁 530004)

摘要: 在 L1 频段上, Galileo 系统的授权服务信号 L1P 和开放服务信号 L1F 共用中心频点 1 575.42 MHz, 它们的功率谱部分重叠, 相互之间存在干扰。通过仿真研究 L1P 和 L1F 信号间的干扰, 对它们的干扰系数、载噪比衰减值进行了详细分析, 找出了决定这两种信号间干扰大小的主要因素。仿真结果显示, L1P 信号受到来自于 L1F 信号的最大干扰为 0.002 dB, 来自于 CDMA 干扰的最大值为 0.26 dB; L1F 受到来自于 L1P 信号的最大干扰几乎为 0 dB, 来自于 CDMA 干扰的最大值为 0.604 dB。这表明, CDMA 干扰是主要干扰源, L1P 和 L1F 信号间的干扰可以忽略。这主要受益于 L1P 信号采用余弦相位的 BOC 调制, L1F 信号采用 CBOC 调制, 使这两个信号的功率谱重叠部分大大减少, 从而干扰系数很小, 大大减小了它们间的干扰。

关键词: 伽利略全球导航卫星系统; 系统内部干扰; 干扰系数; BOC 调制

中图分类号: TN961 **文献标识码:** A doi: 10.3969/j.issn.1001-893x.2011.09.009

Interference Analysis between L1F Signals and L1P Signals of Galileo System

HUANG Xu-fang

(Department of Computer and Electronic Information, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: The Galileo system transmits L1P signal (for public regulated service) and L1F signal (for open service) at a center frequency of 1 575.42 MHz in L1 band. The interference between each other is inevitable due to power spectrum overlap. In this paper, the interference between L1F and L1P signal is researched, the interference coefficient and the CNR(Carrier to Noise Ratio) degradation are analysed, and the main factors determining the strength of the two types of signal are found out. Simulation results show that, the L1P signal suffers about 0.002 dB the maximum interference created by the L1F signal, and about 0.26 dB by the maximum Code Division Multiple Access(CDMA) interference; the L1F signal suffers almost negligible interference from the L1P signal and about 0.604 dB the maximum CDMA interference. The result indicates that, the CDMA interference is preponderant and drives the total degradation of intra-system degradation, and the interference between L1P and L1F signal is almost negligible. This mainly benefits from L1P signal using cosine phase of Binary offset Carrier(BOC) modulation, and L1F signal using Compositod Binary offset Carrier(CBOC) modulation, so that the power spectrum of the two signals overlap greatly reduces, the interference coefficient is very small, greatly reducing the interference between them.

Key words: Galileo system; intra-system interference; interference coefficient; BOC modulation

收稿日期: 2011 - 04 - 29; 修回日期: 2011 - 07 - 22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61004123); 广西自然科学基金资助项目(2011GXNSFA018155); 广西大学科研基金资助项目(XB2090844, XGL090032)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No. 61004123); The Natural Science Foundation of Guangxi (2011GXNSFA018155); The Scientific Research Foundation of Guangxi University(XB2090844, XGL090032)

1 引言

Galileo 系统在 E2 - L1 - E1(简称 L1)频段上发射授权服务信号 L1P 和公共服务信号 L1F,这两种信号间干扰虽在文献[1]中有过仿真,但其仿真结果是基于 2002 年的信号体制结构,而 Galileo 系统在 2007 年对 L1 频段上的信号结构进行了修改[2]。L1F 信号采用 CBOC(6,1,1/11)调制方式[3],L1P 信号采用 BOCc(15,2.5)调制方式。Galileo 信号结构不断演进的目的是为了探索一种新的信号结构,既能满足与 GPS 系统信号兼容和互操作的需要,又能进一步提高 Galileo 系统的性能。为了了解 Galileo 系统在进行信号结构选择时如何考虑内部干扰,寻找决定内部干扰大小的主要因素,本文对 L1P 信号分别采用 BOCs(14,2)和 BOCc(15,2.5)调制方式时受到的内部干扰以及对 L1F 信号分别采用 BOC(1,1)和 CBOC(6,1,1/11)时受到的内部干扰进行比较,并把仿真结果与 GPS 的系统内部干扰进行比较,得出的一些结论有助于“北斗”全球卫星导航系统在考虑内部干扰时如何选择信号结构。

2 理论分析方法

分析卫星导航系统内部干扰的具体方法见文献[4,5],下面只给出计算 L1P 信号和 L1F 信号内部干扰的相关公式。对于 L1P 信号,接收某一颗可见卫星发射的目标信号时,该信号受到的内部干扰来自于视界内所有卫星发射的 L1F 信号和除了目标信号之外的其它 L1P 信号,该信号因内部干扰引起的载噪比衰减 D_{L1P} 为

$$D_{L1P} = 10 \lg \left(1 + \frac{C_1}{N_0} \right) \quad (1)$$

式中, N_0 是系统热噪声功率谱密度,单位为 W/Hz; C_1 表示总的内部干扰的等效功率谱密度(单位为 W/Hz)为

$$C_1 = \sum_{i=1}^{I-1} P_{P1}^{(i)} k_P^{(i)}(\Delta f_P^{(i)}) + \sum_{i=1}^I P_{F1}^{(i)} k_{FP}^{(i)}(\Delta f_{FP}^{(i)}) \quad (2)$$

式中, I 表示接收机视界内可见卫星颗数,目标信号将受到 $(I-1)$ 个非目标 L1P 信号干扰以及 I 个 L1F 信号干扰。 $P_{P1}^{(i)}$ 是第 i 颗非目标 L1P 信号的接收功率, $P_{F1}^{(i)}$ 是第 i 颗 L1F 信号的接收功率; $\Delta f_P^{(i)}$ 和 $\Delta f_{FP}^{(i)}$ 分别是第 i 个非目标 L1P 信号、第 i 个 L1F 信号与目标信号间的频差; $k_P^{(i)}$ 是第 i 个非目标 L1P 信号与目标信号间的干扰系数,单位为 1/Hz,由于

L1P 信号是长码[6],不考虑伪码序列对功率谱密度的影响,每个 L1P 信号的功率谱一样,因此干扰系数可以简化(见式(3))。 $k_{PP}^{(i)}$ 是第 i 个 L1F 信号与目标信号间的干扰系数,计算式见式(4)。

$$k_P(\Delta f_P^{(i)}) = \frac{\int_{-B/2}^{B/2} |H(f)|^2 G_P(f + \Delta f_P^{(i)}) G_P(f) df}{\int_{-B/2}^{B/2} |H(f)|^2 G_P(f) df} \quad (3)$$

$$k_{FP}^{(i)}(\Delta f_{FP}^{(i)}) = \frac{\int_{-B/2}^{B/2} |H(f)|^2 G_{F1}^{(i)}(f + \Delta f_{FP}^{(i)}) G_P(f) df}{\int_{-B/2}^{B/2} |H(f)|^2 G_P(f) df} \quad (4)$$

式中, $H(f)$ 是接收机前端滤波器传输函数; B 是接收机前端滤波器带宽,取 32 MHz; $G_P(f)$ 和 $G_{F1}^{(i)}(f)$ 分别是 L1P 信号和第 i 个 L1F 信号在无穷带宽上的归一化功率谱密度。

L1F 信号由数据信道和导航信道构成,这两个信道采用相同的子载波调制方式,功率为总功率的 50%,当不考虑伪码序列时,这两个信道的基本参数相同(见表 1)。

表 1 干扰系数

Table 1 Interference coefficient

目标信号	干扰信号			
	BOCc (15,2.5)	BOCs (14,2)	CBOC (6,1,1/11)	BOCs (1,1)
BOCc(15,2.5)	-69.09	—	-90.79	-90.67
BOCs(14,2)	—	-68.69	-85.37	-85.09
CBOC (6,1,1/11)	-102.51	-87.21	-65.48	—
BOCs(1,1)	-104.27	-87.02	—	-64.76

在分析它们对 L1P 信号的干扰时,文中把这两个信道合并起来等效为一个信号。当分析它们受到 L1P 信号的干扰时,需要分别考虑它们各自受到的干扰,只是由于这两个信道的基本参数相同,因此受到的干扰相同,只需对其中一个信道进行干扰分析。下面对导航信道进行分析,对于某一导航信号因内部干扰引起的载噪比衰减 D_{L1F} (单位为 dB) 为

$$D_{L1F} = 10 \lg \left(1 + \frac{C_2}{N_0} \right) \quad (5)$$

式中, C_2 表示该导航信号受到总的内部干扰的等效功率谱密度(单位为 W/Hz),计算式为

$$C_2 = \sum_{i=1}^{2I-1} P_{F2}^{(i)} k_F^{(i)}(\Delta f_F^{(i)}) + \sum_{i=1}^I P_{P2}^{(i)} k_{PF}^{(i)}(\Delta f_{PF}^{(i)}) \quad (6)$$

式中, I 表示接收机视界内可见卫星颗数, 目标信号将受到 $(I - 1)$ 个非目标导航信号干扰, 以及 I 个数据信号干扰、 I 个 L1P 信号干扰, 非目标导航信号和数据信号基本参数相同, 合并起来就是 $(2I - 1)$ 个干扰源; $P_{F_2}^{(i)}$ 是第 i 颗非目标 L1F 导航信号的接收功率(为总功率的一半); $P_{P_2}^{(i)}$ 是第 i 颗 L1P 信号的接收功率; $\Delta f_F^{(i)}$ 和 $\Delta f_{PF}^{(i)}$ 分别是第 i 个非目标导航信号、第 i 个 L1P 信号与目标导航信号间的频差; $k_F^{(i)}$ 是第 i 个非目标导航信号与目标导航信号间的干扰系数, 假设导航信号是长码, 干扰系数可以简化为式(7); $k_{PF}^{(i)}$ 是第 i 个 L1P 信号与目标导航信号间的干扰系数, 同样可以简化。

$$k_F(\Delta f_F^{(i)}) = \frac{\int_{-B/2}^{B/2} |H(f)|^2 G_F(f + \Delta f_F^{(i)}) G_F(f) df}{\int_{-B/2}^{B/2} |H(f)|^2 G_F(f) df} \quad (7)$$

$$k_{PF}(\Delta f_{PF}^{(i)}) = \frac{\int_{-B/2}^{B/2} |H(f)|^2 G_P(f + \Delta f_{PF}^{(i)}) G_F(f) df}{\int_{-B/2}^{B/2} |H(f)|^2 G_F(f) df} \quad (8)$$

式中, 前端带宽 B 取 24 MHz; $G_F(f)$ 是 L1F 导航信号在无穷带宽上的归一化功率谱密度, 与式(4)中的 $G_{F1}^{(i)}(f)$ 解析式一样, 为

$$G_F(f) = \frac{10}{11} G_{BOCc(1,1)}(f) + \frac{1}{11} G_{BOCc(6,1)}(f) = \frac{10}{11 R_{Base}} \left[\text{sinc}\left(\frac{\pi f}{R_{Base}}\right) \tan\left(\frac{\pi f}{2 R_{Base}}\right) \right]^2 + \frac{1}{11 R_{Base}} \left[\text{sinc}\left(\frac{\pi f}{R_{Base}}\right) \tan\left(\frac{\pi f}{12 R_{Base}}\right) \right]^2 \quad (9)$$

$G_P(f)$ 的解析式为

$$G_P(f) = \frac{1}{2.5 R_{Base}} \left[\frac{\text{sinc}\left(\frac{\pi f}{2.5 R_{Base}}\right) \cdot \left\{ \cos\left(\frac{\pi f}{30 R_{Base}}\right) - 1 \right\}}{\cos\left(\frac{\pi f}{30 R_{Base}}\right)} \right]^2 \quad (10)$$

其中, $R_{Base} = 1.023$ Mchip/s。

3 仿真分析

仿真时进行以下假设:

(1) 前端滤波器是单位幅度理想线性带通滤波器;

(2) 用 Galileo 规定的 10° 仰角下最大最小接收功率^[7,8]作为天线输入端接收到的功率, L1P 信号最大最小接收功率为 $-158/-154$ dBW, L1F 信号最大最

小接收功率为 $-157/-154$ dBW;

(3) 系统热噪声 N_0 为 -201 dBW/Hz;

(4) 接收信号相对于卫星的多普勒频偏一样。

基于这些假设, 对 L1P 和 L1F 信号受到的内部干扰进行仿真分析。在 10° 仰角时, Galileo 系统最多和最少可见卫星数分别为 11 颗和 7 颗^[9]。

表 1 给出 BOCc(15, 2.5)、BOCs(14, 2)、BOCs(1, 1) 和 CBOC(6, 1, 1/11) 信号之间的干扰系数, 其中前两者前端带宽取 32 MHz, 后两者前端带宽取 24 MHz。仔细观察这些数值, 并结合图 1 Galileo L1 上信号的功率谱包络, 可以得出以下结论:

(1) BOCc(15, 2.5) 信号的自干扰系数比 BOCs(14, 2) 信号的略小。这与前者采用余弦相位有关, 余弦相位的 BOC 信号功率谱旁瓣在中心频率处衰减比正弦相位快(见图 1)。

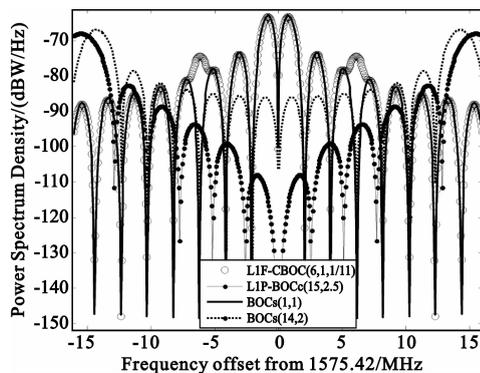


图 1 Galileo L1 频段上信号的功率谱包络
Fig. 1 Power spectrum density of Galileo signals in L1 band

(2) CBOC(6, 1, 1/11) 信号的自干扰系数比 BOCs(1, 1) 信号的略小 0.72 dB。仔细观察这两个信号的功率谱会发现, 前者虽然在 ± 6.138 MHz 处有两个高幅度谱瓣, 但后者的功率谱包络幅度要比前者稍大一点。

(3) 当 CBOC(6, 1, 1/11) 信号为干扰信号时, 它与 BOCc(15, 2.5) 信号的干扰系数比它与 BOCs(14, 2) 信号的干扰系数小 5 dB 左右。但当它为目标信号时, 它与 BOCc(15, 2.5) 的干扰系数减小 12 dB 左右, 它与 BOCs(14, 2) 的干扰系数减小 2 dB 左右, 而且前者的干扰系数比后者小 15 dB 左右。出现这种现象是因为干扰信号 BOCc(15, 2.5)、BOCs(14, 2) 通过 24 MHz 的前端带宽时主瓣被滤除, 而且 BOCc(15, 2.5) 的旁瓣衰减得很快, 因此它与 CBOC(6, 1, 1/11) 的干扰系数衰减得更快。

(4)当 BOCc(15,2.5)为目标信号时,它与 CBOC(6,1,1/11)的干扰系数比它与 BOCs(1,1)的干扰系数略小0.12 dB。但当它为干扰信号时,它与 CBOC(6,1,1/11)的干扰系数反而比它与 BOCs(1,1)的干扰系数大2 dB左右。这与前端带宽和功率谱包络幅度有关。

表 2 和表 3 给出了最坏最好情况下^[4]各信号受到的 CDMA 干扰,以及彼此间干扰造成的最大和最小载噪比衰减值,可见:

(1)在总的载噪比衰减值中,CDMA 干扰造成的载噪比衰减值占绝大部分。

(2)相比于 BOCs(14,2)调制信号,BOCc(15,

2.5)使内部干扰改善了约0.03 dB;相比于 BOCs(1,1)调制信号,CBOC(6,1,1/11)使内部干扰改善了约0.1 dB。

(3)相比于 BOCs(14,2)和 BOCc(15,2.5)调制信号,CBOC(6,1,1/11)和 BOCs(1,1)信号的 CDMA 干扰要大出约0.4 dB。

(4)CBOC(6,1,1/11)为目标信号时,它与 BOCs(14,2)信号间的干扰系数比它与 BOCc(15,2.5)间的干扰系数大15 dB,但这两者对其干扰带来的载噪比衰减值几乎一样。这说明,干扰系数作为中间结果,只要其绝对值足够小,虽然两组信号间的干扰系数差值很大,但对干扰的影响就已经很小了。

表 2 L1P 信号的载噪比衰减值
Table 2 CNR degradation of L1P signal

目标信号	最大/最小 CDMA 干扰值	干扰信号	干扰信号	总的载噪比衰减值 (最大/最小值)	
		CBOC(6,1,1/11) 最大/最小值	BOCs(1,1) 最大/最小值	CBOC(6,1,1/11)	BOCs(1,1)
BOCc(15,2.5)	0.260 4/0.063 6	0.001 9/0.000 7	0.002 0/0.000 7	0.262 3/0.064 3	0.262 4/0.064 3
BOCs(14,2)	0.284 9/0.069 8	0.006 5/0.002 1	0.006 9/0.002 3	0.291 4/0.071 9	0.291 8/0.072 1

表 3 L1F 信号的载噪比衰减值
Table 3 CNR degradation of L1F signal

目标信号	CDMA 干扰 最大/最小值	干扰信号	干扰信号	总的载噪比衰减值 (最大/最小值)	
		BOCc(15,2.5) 最大/最小值	BOCs(14,2) 最大/最小值	CBOC(6,1,1/11)	BOCs(1,1)
CBOC(6,1,1/11)	0.604 3/0.196 6	0.000 1/0.000 1	0.003 9/0.001 1	0.604 4/0.196 7	0.608 2/0.197 7
BOCs(1,1)	0.705 3/0.231 3	0.000 1/0.000 1	0.004 0/0.001 2	0.705 4/0.231 4	0.709 3/0.232 5

4 Galileo 与 GPS 系统在 L1 频段上的内部干扰比较

将 Galileo 与 GPS 的内部干扰^[4]进行比较,得到以下结论:

(1)最坏情况下,L1F 导航信号受系统内干扰引起的最大载噪比衰减值约为0.6 dB,比 GPS L1C 导航信号的最大载噪比衰减值(1.19 dB)小0.59 dB左右;最好情况下,前者最小载噪比衰减值约为0.2 dB,比后者的最小载噪比衰减值(0.3 dB)小0.1 dB左右;

(2)最坏情况下,L1P 信号受系统内干扰引起的最大载噪比衰减值约为0.262 3 dB,比 GPS M 码的最大载噪比衰减值(0.398 dB)小0.1 dB左右。

可见,GPS 系统内部干扰比 Galileo 系统内部干扰严重,这与 GPS 的 C/A 码是短码^[6]密切相关,而

且 GPS 在 L1 频段上信号源较多,信号间干扰增多。另外,GPS 的最大发射功率普遍略高于 Galileo 的。

5 结 论

通过本文的分析,可以得出以下结论:

(1)Galileo 系统的 L1P 信号与 L1F 信号间的干扰很小,它们受到的内部干扰主要是 CDMA 干扰;

(2)Galileo 系统在进行信号结构选择时,L1P 信号通过采用余弦相位的 BOC 调制方式,以及提高子载波速率和码速率,使其与 L1F 信号的功率谱进一步错开,显著减小了干扰系数,达到了减小内部干扰的目的;L1F 信号则采用复合的 BOC 调制方式,通过适当选择子载波速率和码速率,也达到了改善系统内部干扰的目的,而且,这两种调制方式还有效提高了系统的码跟踪精度和抗多径干扰能力^[9];

(3)“北斗”全球导航卫星系统的信号结构^[10]在

L1 频段上采用 BOCs(14,2)和 MBOC(6,1,1/11)调制方式,与 Galileo 系统的信号结构很接近,因此,“北斗”系统除了要考虑内部干扰,还要谨慎对待系统间干扰,这将另文探讨。

参考文献:

- [1] Godet J, De Mateo J C, Erhard P, et al. Assessing the Radio Frequency Compatibility between GPS and Galileo[C]// Proceedings of the 15th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation. Portland, OR: ION, 2002: 1260 – 1269.
- [2] Avila – Rodriguez J A, Hein G W, Wallner S, et al. The MBOC modulation: the final touch to the Galileo frequency and signal plan [C]// Proceedings of the 20th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation. Fort Worth: ION, 2007: 1515 – 1529.
- [3] 黄旭方,胡修林,陈晓翔. BOC、MBOC 和 CBCS 三种子载波调制方式的性能分析[J]. 电讯技术, 2008, 48(10): 63 – 68.
HUANG Xu – fang, HU Xiu – lin, CHEN Xiao – xiang. Performance analysis of BOC, MBOC and CBCS modulation[J]. Telecommunication Engineering, 2008, 48(10): 63 – 68. (in Chinese)
- [4] 黄旭方,覃团发,唐秋玲. GPS L1 频段上的系统内干扰的研究[J]. 宇航学报, 2010, 31(10): 2402 – 2406.
HUANG Xu – fang, QIN Tuan – fa, TANG Qiu – ling. Study of intra – system interference in GPS L1 band[J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(10): 2402 – 2406. (in Chinese)
- [5] Titus L B M, Betz J W, Hegarty C J, et al. Intersystem and intrasystem interference analysis methodology [C]// Proceedings of the 16th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation. Portland, OR: ION, 2003: 9 – 12.

- [6] 黄旭方,胡修林,唐祖平,等. 导航系统中短码受到系统内干扰的分析方法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2009, 37(3): 46 – 49.
HUANG Xu – fang, HU Xiu – lin, TANG Zu – ping, et al. Methodology for analyzing intrasystem interference of short – code in navigation systems[J]. Journal of Huazhong University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2009, 37(3): 46 – 49. (in Chinese)
- [7] Strodl K, Trautenberg H L, Weber T. GALILEO system architecture[C]// Proceedings of the 16th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation. Portland, OR: ION, 2003: 549 – 566.
- [8] Rebeyrol E, Julien O, Macabiau C, et al. Galileo civil signal modulations[J]. GPS Solutions, 2007, 11(3): 159 – 171.
- [9] Simsky A, Mertens D, Sleewaegen J M, et al. Multipath and tracking performance of Galileo ranging signals transmitted by GIOVE – A[C]// Proceedings of the 21st International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation. Fort Worth: ION, 2007: 1525 – 1536.
- [10] ICG Working Group. COMPASS view on compatibility and interoperability[EB/OL]. (2009 – 10 – 21)[2011 – 07 – 22] <http://www.unoosa.org/pdf/icg/2009/workgroupinterop/04.pdf>.

作者简介:

黄旭方(1977—),女,广西河池人,2009年获博士学位,现为副教授、硕士生导师,主要研究方向为卫星导航、无线通信理论。

HUANG Xu – fang was born in Hechi, Guangxi Zhuang Autonomous Region, in 1977. She received the Ph.D. degree in 2009. She is now an associate professor and also the instructor of graduate students. Her research interests include satellite navigation and wireless communication theory.

Email: hxf_andalan@163.com