



Compass导航信号性能评估研究

唐祖平^{①*}, 周鸿伟^②, 胡修林^①, 冉一航^①, 刘禹圻^①, 周艳玲^①

① 华中科技大学电子与信息工程系, 武汉 430074;

② 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094

* E-mail: tangping_cn@163.com

收稿日期: 2010-04-07; 接受日期: 2010-04-09

摘要 卫星导航信号体制决定了导航系统的先天性能, 是系统设计和升级过程中必须考虑的关键因素之一. 本文提出了卫星导航信号体制的性能评估方法, 并评估了 Compass 信号的性能. 该评估方法包含了精度、抗干扰、抗多径、兼容性四个方面的内容, 分别采用了 Gabor 带宽、解调抗窄带/匹配谱干扰品质因数、跟踪抗窄带/匹配谱干扰品质因数、多径误差包络、连续平均多径误差包络、谱分离系数、谱安全指数等指标来刻画这些方面的性能. 基于我国对外公布的最新信号体制框架, 将 Compass 信号体制和 GPS, Galileo 信号体制进行对比分析. 分析结果表明: 对于民用信号, Compass 的性能最佳; 对于特殊用户, Compass 的精度、抗多径能力和 GPS, Galileo 相当, 但抗干扰能力低于 GPS 和 Galileo. 这意味着 Compass 系统在未来的特殊条件下处于劣势. 最后, 给出了信号体制优化的建议.

关键词 全球导航卫星系统, 信号体制, Compass, GPS, 伽利略

PACS: 91.10.Fc, 84.40.Ua, 06.20.Dk, 06.30.Ft, 07.05.Tp

卫星导航信号体制决定了导航系统的先天性能, 是系统设计和升级过程中必须考虑的关键因素. 2007年7月26日, 美国和欧盟发表联合声明将 MBOC (6,1,1/11)定为 GPS L1C 和 Galileo L1OS 的调制方式 (http://useu.usmission.gov/Dossiers/Galileo_GPS/Jul26_07_Civil_Signal_Accord.asp; http://europa.eu/rapid/press_ReleasesAction.do?reference=IP/07/1180&format=HTML&aged=0&language=EN&guiLanguage=fr), 现代化 GPS 和 Galileo 信号体制才最终得以确定. 2009年7月, 中国卫星导航定位应用管理中心(CNAGA)在 ICG 会议上公开了 Compass 导航信号体制的最新状态 (<http://www.unoosa.org/pdf/icg/2009/workgroupinterop/04.pdf>). 对于 GPS 和 Galileo 导航信号体制, 美国和欧盟的相关机构做了大量的分析评估工作. 但是

在公开发表的文献中, 主要讨论民用信号的性能^[1,2], 且主要集中于精度、抗多径和兼容性方面^[3,4], 很少提及授权信号的性能, 特别是授权信号的抗干扰能力. 此外, 在系统兼容方面, GPS 和 Galileo 增加了国家安全的考虑, 提出授权信号频谱分离的理念, 但未给出相应的评价方法. 本文从精度、抗干扰、抗多径、兼容性(含安全性)4个方面提出了导航信号性能评估方法, 并基于最新公开的信号体制参数对 Compass, GPS 和 Galileo 3个系统的民用信号、授权信号进行比较全面的对比分析.

1 Compass信号体制现状

我国最新对外公开的 Compass 导航信号体制参

数见表1. Compass 导航信号占用3个频带, 中心频点分别位于 1575.42 MHz(B1), 1191.795 MHz(B2), 1268.52 MHz(B3). Compass 在 B1 频带上同时提供开放服务(OS)和授权服务(AS), B2 频带上仅提供开放服务, B3 频带上仅提供授权服务. GPS 和 Galileo 系统的导航信号体制参数分别见表2和表3. GPS 在 L1, L2 两个频带上同时提供开放服务和授权服务, 在 L5 频带上仅提供开放服务. Galileo 在 E1 频带上同时提供开放服务和公共特许服务(PRS), 在 E5 频带上仅提

供开放服务, E6 频带上同时提供商用服务(CS)和公共特许服务(PRS). Galileo 系统的公共特许服务为军用, 商用服务为民用, 它们都需要授权才能接入. GPS 不存在这种区分, 授权服务完全为军用. Compass 系统在 B1 频带上设置授权服务, 但 B3 频带授权服务的用途并未明确. 为了便于系统间的比较, 本文假设 B3 频带 QPSK(10)信号分量为民用的授权服务, 即类同于 GalileoE6C.

在公开的 Compass 信号体制参数中, 并未明

表1 Compass 信号体制参数

信号分量	载波频率(MHz)	码速率(Mcps)	信息速率(bps)/符号速率(sps)	调制方式	服务类型
B1-C _D	1575.42	1.023	50/100	MBOC(6,1,1/11)	OS
B1-C _P		1.023	No		
B1 _D		2.046	50/100	BOC(14,2)	AS
B1 _P		2.046	No		
B2a _D	1191.795	10.23	25/50	AltBOC(15,10)	OS
B2a _P		10.23	No		
B2b _D		10.23	50/100		
B2b _P		10.23	No		
B3	1268.52	10.23	500/500	QPSK(10)	AS
B3-A _D		2.5575	50/100	BOC(15,2.5)	AS
B3-A _P		2.5575	No		

表2 GPS 信号体制参数

信号分量	载波频率(MHz)	码速率(Mcps)	信息速率(bps)/符号速率(sps)	调制方式	服务类型
L1C/A	1575.42	1.023	50/50	BPSK	OS
L1C _D		1.023	50/100	MBOC(6,1)	OS
L1C _P		1.023	No		
L1P(Y)		10.23	50/50	BPSK	AS
L1M		5.115	未公开	BOC(10,5)	AS
L5C _D	1176.45	10.23	50/100	QPSK	OS
L5C _P		10.23	No		
L2C _D	1227.6	1.023	25/50	BPSK	OS
L2C _P		(CM/CL)	No		
L2P(Y)		10.23	50/50	BPSK	AS
L2M		5.115	未公开	BOC(10,5)	AS

表3 Galileo 信号体制参数

信号分量	载波频率(MHz)	码速率(Mcps)	信息速率(bps)/符号速率(sps)	调制方式	服务类型
E1PRS	1575.42	2.5575	未公开	BOC _c (15,2.5)	PRS
E1OS _D		1.023	125 / 250	MBOC(6,1,1/11)	OS
E1OS _P		1.023	No		
E5a _D	1191.795	10.23	25 / 50	AltBOC(15,10)	OS
E5a _P		10.23	No		
E5b _D		10.23	125 / 250		
E5b _P		10.23	No		
E6PRS	1278.75	5.115	未公开	BOC _c (10,5)	PRS
E6CS _D		5.115	500 / 1000	BPSK(5)	CS
E6CS _P		5.115	No	BPSK(5)	

确给出信号的发射带宽,而实际上发射带宽对信号性能有着显著的影响.本文中,假设:Compass系统,B1,B3频点信号的发射带宽为40.92 MHz,B2频点信号发射带宽为71.61 MHz;GPS系统,L1,L2,L5频点信号的发射带宽均为30.69 MHz;Galileo系统,E1,E6频点信号的发射带宽为40.92 MHz,E5频点信号发射带宽为71.61 MHz.

2 信号体制评估方法

导航信号体制对系统性能的影响主要体现在精度、抗干扰、抗多径和兼容性4个方面.

(i) 精度.相干环路码跟踪误差下界为^[5]

$$\sigma_T^2 = \frac{B_L}{C/N_0} \frac{1}{(\Delta\omega)^2}, \quad (1)$$

其中 B_L 为码环带宽,单位为Hz; C/N_0 为载噪比,单位为Hz; $\Delta\omega$ 为Gabor带宽,定义式 $\Delta\omega = 2\pi\sqrt{\int_{-\beta/2}^{\beta/2} f^2 G_s(f) df}$ (rad/s); σ_T^2 为伪码跟踪的均方误差,单位为 s^2 .本评估文档中采用Hz为单位的形式,即

$$\Delta f_{\text{Gabor}} = \sqrt{\int_{-\beta/2}^{\beta/2} f^2 G_s(f) df} \text{ (Hz)}, \quad (2)$$

式中 f 为频率,单位为Hz; $G_s(f)$ 为等效基带信号的归一化功率谱密度,单位为 Hz^{-1} ; β_r 为接收带宽,单位为Hz.

在相同的码环带宽和载噪比条件下,定义不同信号间的相干码跟踪精度比

$$\begin{aligned} R_{\text{CCTAC}} &= 10 \times \log_{10} \left(\frac{\sigma_{T0}^2}{\sigma_{T1}^2} \right) \\ &= 20 \times \log_{10} \left(\frac{\Delta f_{\text{Gabor0}}}{\Delta f_{\text{Gabor1}}} \right) \text{ (dB)}, \end{aligned} \quad (3)$$

式中 σ_{T0}^2 为参考信号的码跟踪均方误差, σ_{T1}^2 为目标信号的码跟踪均方误差, Δf_{Gabor1} 为目标信号的Gabor带宽, Δf_{Gabor0} 为参考信号的Gabor带宽. R_{CCTAC} 值越大,同等条件下目标信号能达到的码跟踪精度越高.当 $R_{\text{CCTAC}} > 0$,目标信号的码跟踪精度高于参考信号,当 $R_{\text{CCTAC}} = 0$,目标信号的码跟踪精度等于参考信号,当 $R_{\text{CCTAC}} < 0$,目标信号的码跟踪精度低于参考信号.

由定义式(3)可知, R_{CCTAC} 具有如下的含义:如果目标信号相对于参考信号的码跟踪精度比为 R_{CCTAC} (dB),那么在 C/N_0 比参考信号低 R_{CCTAC} (dB)的条件下,目标信号也可获得与参考信号相同的码跟踪精度.

(ii) 抗干扰能力.在接收机无任何抗干扰措施的情况下,中心频率位于信号功率谱峰值点的窄带干扰对接收机的干扰效果最为明显;在考虑接收机抗干扰措施的情况下,匹配谱干扰是最难去除干扰类型.因此,本文主要考虑两种类型的干扰:窄带(干扰带宽远小于信号带宽)干扰和匹配谱干扰.

接收机对导航信号的接收处理过程包括:捕获、跟踪(伪码跟踪和载波跟踪)和解调.不同的处理过程,干扰信号对导航信号的影响效果不尽相同.对捕获、载波跟踪和解调性能起决定性作用的是接收信号与参考信号即时支路相关输出的信噪比;对伪码跟踪性能起决定性作用的是鉴别器输出的信噪比,它与参考信号超前、滞后支路相关.本文以解调和伪码跟踪为两方面的代表.

解调性能取决于接收信号的 $(E_b/N_0)_{\text{eff}}$ 和编码性能,在强干扰条件下

$$\left(\frac{E_b}{N_0} \right)_{\text{eff}} = \frac{C}{R_d(N_0 + J\chi_{J,s})} \approx \frac{C}{J R_d \chi_{J,s}}, \quad (4)$$

式中 R_d 为信息速率, $\chi_{J,s}$ 为干扰与信号之间的谱分离系数,定义为

$$\chi_{J,s} = \int_{-\beta/2}^{\beta/2} G_J(f) G_s(f) df, \quad (5)$$

式中 β_r 为接收带宽, $G_s(f)$ 和 $G_J(f)$ 分别为有用信号和干扰信号在各自的发射带宽内归一化的功率谱密度.剥离信息层面上的编码因素,解调抗干扰能力与 $1/R_d \chi_{J,s}$ 成正比.因此,我们将解调抗干扰品质因数定义为

$$Q_{\text{DemAJ}} = 10 \times \log_{10} \left(\frac{1}{R_d \chi_{J,s}} \right) \text{ (dB)}, \quad (6)$$

对于窄带干扰,干扰功率谱密度建模为

$$G_J(f) = \delta(f - f_j), \quad (7)$$

式中 f_j 为干扰频率相对信号载波频率的偏移量.结合(5)~(7)式可知,窄带干扰的效果取决于信号的归一化功率谱密度.当窄带干扰的频率对应信号功率

谱的最大值, 对解调性能的干扰效果最为明显. 显然, 有意干扰必定是以最大干扰效果为目标的. 因此, 将这种极端情况下的解调抗干扰品质因数定义为解调抗窄带干扰品质因数, 表达为

$$Q_{\text{DemAJNW}} = 10 \times \log_{10} \left(\frac{1}{R_d \times \max[G_s(f)]} \right) \text{(dB)}, \quad (8)$$

式中 $\max[\cdot]$ 表示取最大值的运算. 对于匹配谱干扰, $G_J(f) = G_s(f)$, 则解调抗匹配谱干扰品质因数为

$$Q_{\text{DemAJMS}} = 10 \times \log_{10} \left(\frac{1}{R_d \times \int_{-\beta/2}^{\beta/2} G_s^2(f) df} \right) \text{(dB)}, \quad (9)$$

从文献[6~8]的分析可知, 对于相干 EML 码跟踪环路, 干扰条件下的等效载噪比为

$$\left(\frac{C}{N_0} \right)_{\text{eff}} = \frac{C}{N_0 + J\eta_{J,s}}, \quad (10)$$

式中 $\eta_{J,s}$ 为码跟踪谱灵敏度系数^[6], 定义为

$$\eta_{J,s} = \frac{\int_{-\beta_r/2}^{\beta_r/2} G_J(f) G_s(f) \sin(\Delta\pi f)^2 df}{\int_{-\beta_r/2}^{\beta_r/2} G_s(f) \sin(\Delta\pi f)^2 df}, \quad (11)$$

当相关器间隔取值很小时, 假设 $\Delta \rightarrow 0$, 有

$$\eta_{J,s} = \frac{\int_{-\beta_r/2}^{\beta_r/2} f^2 G_J(f) G_s(f) df}{\int_{-\beta_r/2}^{\beta_r/2} f^2 G_s(f) df}, \quad (12)$$

强干扰条件下, 等效载噪比近似为

$$\left(\frac{C}{N_0} \right)_{\text{eff}} \approx \frac{C}{J} \frac{1}{\eta_{J,s}} \approx \frac{C}{J} \frac{\int_{-\beta_r/2}^{\beta_r/2} f^2 G_s(f) df}{\int_{-\beta_r/2}^{\beta_r/2} f^2 G_J(f) G_s(f) df}, \quad (13)$$

可见, 码跟踪抗干扰能力与 $1/\eta_{J,s}$ 成正比. 因此, 我们将码跟踪抗干扰品质因数定义为

$$Q_{\text{CTAJ}} = 10 \times \log_{10} \left(\frac{\int_{-\beta_r/2}^{\beta_r/2} f^2 G_s(f) df}{\int_{-\beta_r/2}^{\beta_r/2} f^2 G_J(f) G_s(f) df} \right) \text{(dB)}, \quad (14)$$

结合窄带干扰和匹配谱干扰的功率谱特性, 采用与解调抗干扰品质因数类似的定义方法, 可得码跟踪抗窄带干扰品质因数为

$$Q_{\text{CTAJNW}} = 10 \times \log_{10} \left(\frac{\int_{-\beta/2}^{\beta/2} f^2 G_s(f) df}{\max[f^2 G_s(f)]} \right) \text{(dB)}, \quad (15)$$

码跟踪抗匹配谱干扰品质因数为

$$Q_{\text{CTAJMS}} = 10 \times \log_{10} \left(\frac{\int_{-\beta/2}^{\beta/2} f^2 G_s(f) df}{\int_{-\beta/2}^{\beta/2} f^2 G_s^2(f) df} \right) \text{(dB)}. \quad (16)$$

综合考虑干扰类型和处理过程, 抗干扰性能的评估可考虑四个主要的性能指标: 解调抗窄带干扰品质因数、解调抗匹配谱干扰品质因数、码跟踪抗窄带干扰品质因数和码跟踪抗匹配谱干扰品质因数. 上述品质因数越大, 表明相应处理环节抗对应干扰的能力越强.

(iii) 抗多径能力. 导航信号的抗多径能力可以采用基于非相干超前-滞后延迟锁定环的码跟踪多径误差包络和平均多径误差来度量^[6,9]. 多径误差包络是不同多径延迟条件下多径效应引起的最大偏差, 可以反映特定多径延迟对应的多径误差的最坏情况. 平均多径误差是多径误差包络随多径延迟变化的累积平均值, 反映的是某一时延范围内多径误差的整体情况.

(iv) 兼容性. 目前, 国际上采用的兼容性评价指标为等效载噪比衰减. 等效载噪比衰减与信号体制、导航星座、发射功率、用户位置均有关联, 在信号体制设计和评估中, 可以采用谱分离系数和码跟踪谱灵敏度系数^[10]作为兼容性评价的中间指标, 从而更加直接地对比不同信号选项在兼容性方面的差别. 谱分离系数和码跟踪谱灵敏度系数的计算式分别采用(5)和(12)式.

除了传统意义上的兼容性之外, GPS 和 Galileo 还考虑了国家安全因素, 并且放在了极其重要的位置, 其重要程度甚至高于传统的兼容性. 与传统的兼容性概念不同, 国家安全考虑了特定情况下的特定需求, 即干扰民用信号和其他系统军用信号的时候不影响本系统军用信号的正常. 从信号体制的角度, 国家安全需求具体表现为军民频谱分离和系统间的军军频谱分离. 由于有意干扰的强度是远高于常规导航信号的, 国家安全对谱分离程度的要求要远高于传统的兼容性要求.

在前面的抗干扰能力分析中提到, 匹配谱干扰

是相对难以剔除的, 因此我们假定对干扰目标信号实施匹配谱干扰. 如果有用信号和干扰目标信号在频谱上重叠, 那么在对目标实施干扰时必然会降低有用信号的性能. 但是, 只要干扰目标信号受到的干扰程度远大于有用信号, 就很容易实现对目标信号实施有效干扰的同时确保有用信号的安全. 干扰目标信号和有用信号受干扰程度的差别越大, 有用信号的安全程度越高. 为了表征这种情况下有用信号的安全程度, 我们提出谱安全指数(Spectral Safety Index)和码跟踪谱安全指数(Code Tracking Spectral Safety Index)的概念, 分别缩写为 SSI 和 CTSSI. 谱安全指数定义为

$$SSI_{s_0, s_1} = 10 \times \log_{10} \left(\frac{\int_{-\infty}^{\infty} G_{s_1}^2(f) df}{\int_{-\infty}^{\infty} G_{s_0}(f) G_{s_1}(f) df} \right) (\text{dB}), \quad (17)$$

式中 s_0 表示有用信号, s_1 表示干扰目标信号, $G_{s_0}(f)$ 表示有用信号的归一化功率谱, $G_{s_1}(f)$ 表示干扰目标信号的归一化功率谱. 谱安全指数的物理意义为: 在针对干扰目标信号实施匹配谱强干扰时, 干扰目标信号的捕获、载波跟踪及解调性能的下陷程度与有用信号对应性能下陷程度之比. 注意, 这里针对性地从频谱分离的角度考虑安全性, 剥离了信息速率和编码对解调性能的影响, 即假设了干扰目标信号和有用信号的信息速率、编码方式相同.

对应地, 针对码跟踪过程, 定义码跟踪谱安全指数(CTSSI)为

$$CTSSI_{s_0, s_1} = \frac{\int_{-\beta_n/2}^{\beta_n/2} f_1^2 G_{s_1}^2(f_1) df_1}{\int_{-\beta_n/2}^{\beta_n/2} f_1^2 G_{s_1}(f_1) df_1} \times \frac{\int_{-\beta_0/2}^{\beta_0/2} f_0^2 G_{s_0}(f_0) df_0}{\int_{-\beta_0/2}^{\beta_0/2} f_0^2 G_{s_1}(f_0) G_{s_0}(f_0) df_0}, \quad (18)$$

式中 β_0 表示有用信号的接收带宽, β_n 表示干扰目标信号的接收带宽. 值得注意的是, f_1 以导航信号 s_1 的载波频率为 0 点, f_0 以导航信号 s_0 的载波频率为 0 点. 码跟踪谱安全指数的物理意义为: 在针对干扰目标信号实施匹配谱强干扰时, 干扰目标信号的码跟踪性能的下陷程度与有用信号码跟踪性能下陷程度之比.

定义(17)和(18)式表明, 有用信号的安全性不仅与有用信号和干扰目标信号之间的谱分离系数、码跟踪谱灵敏度系数有关, 还受到干扰目标信号与自身的谱分离系数和码跟踪谱灵敏度的影响. 干扰目标信号与自身的谱分离系数、码跟踪谱灵敏度越大, 抗匹配谱干扰能力越弱, 对它进行有效干扰所需的干扰功率越小, 有用信号的安全程度越高; 干扰目标信号与有用信号之间的谱分离系数、码跟踪谱灵敏度越小, 对干扰目标信号进行干扰时有用信号受到的影响越小, 有用信号的安全程度越高.

3 Compass, GPS和Galileo信号体制对比分析

3.1 精度

B1 频点 Compass 信号及对应的 GPS 和 Galileo 信号的 Gabor 带宽与接收机前端带宽之间的关系见图 1. CompassB1C, GPSL1C 和 GalileoE1OS 采用了相同的调制方式, 当接收机前端带宽小于 30.69 MHz 时, 它们的 Gabor 带宽相同, 意味着可以达到相同的码跟踪精度; 当前端带宽大于 30.69 MHz 时, GPSL1C 由于发射带宽的限制码跟踪精度得不到提高, 而 CompassB1C 和 Galileo 可继续提高约 2 dB. 和传统民用信号 GPSL1C/A 相比, CompassB1C, GPSL1C 和 GalileoE1OS 的跟踪精度可提高 5~8 dB. 从图 1(b) 可以看到, CompassB1 信号的码跟踪精度高出 GPSL1M 信号约 3.4 dB, 高出 GPSL1P 信号约 10.6 dB, 低于 GPSE1PRS 约 0.9 dB. CompassB1 和 GalileoE1PRS 的精度得益于较高的子载波, 同时它们对前端带宽的要求更高. 当前端带宽超过 28 MHz 时, CompassB1 相对于 GPSL1M 才具有精度优势, 当前端带宽达到 32 MHz 时, 才能接近 CompassB1 的最佳性能.

B2 频点 Compass 信号及对应的 GPS 和 Galileo 信号的 Gabor 带宽与接收机前端带宽之间的关系见图 2. CompassB2 和 GalileoE5 采用了 AltBOC(15,10) 调制方式, 具有相同的码跟踪精度. 当前端带宽达到 50 MHz 时, 相对 GPSL5C 信号精度可提高约 11 dB.

B3 频点 Compass 信号及对应的 GPS 和 Galileo 信号的 Gabor 带宽与接收机前端带宽之间的关系见图 3. CompassB3 信号的精度比 GalileoE6C 高 3 dB

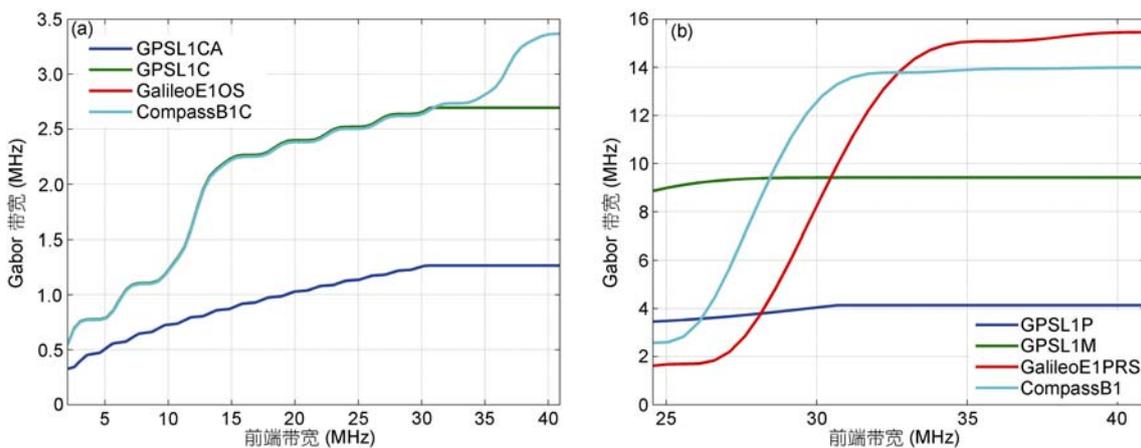


图1 B1频点 Compass 信号与 GPS 和 Galileo 信号的精度比较

(a) 民用信号; (b) 授权信号

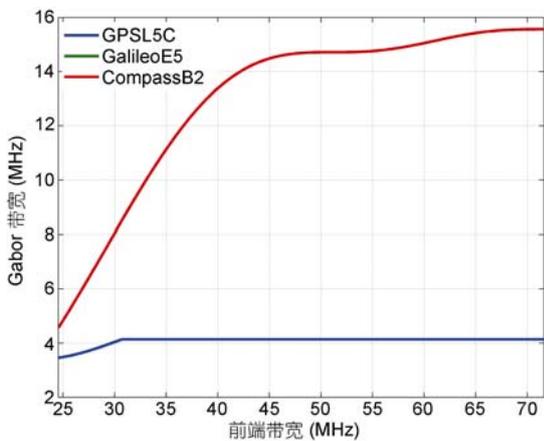


图2 B2频点 Compass 信号与 GPS 和 Galileo 信号的精度比较

左右, 比 GPSL2C 高 10 dB 左右, 它得益于高码速率. 授权 CompassB3A 信号的精度高出 GPSL2M 信号约 4.3 dB, 高出 GPSL2P 信号约 11.5 dB, 高出 GPSE6PRS 约 2.8 dB. 同时, CompassB3A 对接收机前端带宽的要求也最高. 当前端带宽超过 31 MHz 时, CompassB3A 的精度优势才能体现; 当前端带宽达到 35 MHz 时, 才能接近 CompassB3A 的最佳性能.

3.2 抗干扰能力

B1 频点 Compass 信号与对应 GPS 和 Galileo 信号的抗干扰能力对比见图 4. 图 4 中民用信号的接收带宽假定为 14 MHz, 授权信号的接收带宽假定为发射带宽. 可见, 民用信号 CompassB1C 和 GPSL1C 的抗干扰能力相同, 它们的解调抗窄带干扰、解调抗

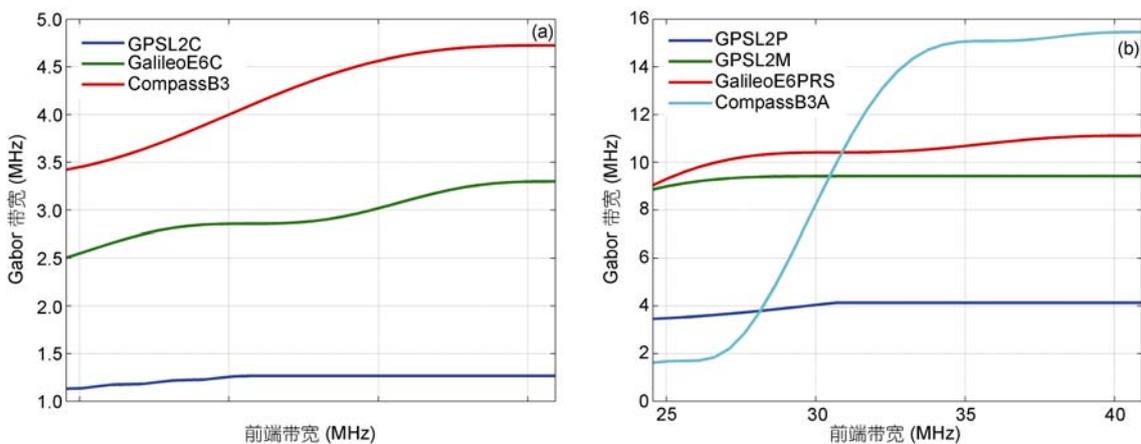


图3 B3频点 Compass 信号与 GPS 和 Galileo 信号的精度比较

(a) 民用信号; (b) 授权信号

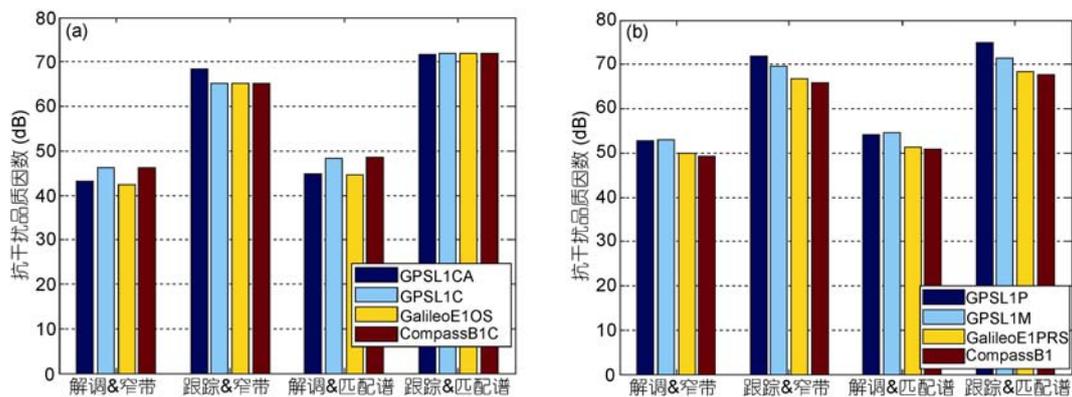


图4 B1频点 Compass 信号与 GPS 和 Galileo 信号的抗干扰能力比较

(a) 民用信号; (b) 授权信号

匹配谱干扰和码跟踪抗匹配谱干扰能力比 GPSL1C/A 信号分别强 3.1, 3.6 和 0.4 dB, 码跟踪抗窄带干扰能力比 GPSL1C/A 信号弱 3.3 dB. GalileoE1OS 的码跟踪抗干扰能力和 CompassB1C 相同, 但解调抗干扰能力比 CompassB1C 弱 4 dB(信息速率高). 授权信号 CompassB1 抗干扰能力弱于 GPSL1P, GPSL1M 和 GalileoE1PRS, 解调抗窄带干扰能力比 GPSL1P, GPSL1M 和 GalileoE1PRS 分别低 3.7, 3.8 和 0.8 dB, 解调抗匹配谱干扰能力比 GPSL1P, GPSL1M 和 GalileoE1PRS 分别低 3.4, 3.7 和 0.6 dB, 码跟踪抗窄带干扰能力比 GPSL1P, GPSL1M 和 GalileoE1PRS 分别低 5.9, 3.5 和 0.9 dB, 码跟踪抗匹配谱干扰能力比 GPSL1P, GPSL1M 和 GalileoE1PRS 分别低 7.3, 3.7 和 0.7 dB.

B2 频点 Compass 信号与对应 GPS 和 Galileo 信号的抗干扰能力对比见图 5. 由图可见, COMPASSB2 信号的码跟踪抗窄带/匹配谱干扰能力与 GalileoE5 相同, 解调抗窄带/匹配谱干扰能力比 GalileoE5 强约 4 dB(由于信息速率比 Galileo 低). CompassB2 信号的解调抗窄带干扰、解调抗匹配谱干扰、码跟踪抗窄带干扰、码跟踪抗匹配谱干扰能力分别比 GPSL5C 强 3.5, 1.1, 3.9 和 0.1 dB.

B3 频点 Compass 信号与对应 GPS, Galileo 信号的抗干扰能力对比见图 6. 整体上, 民用信号 CompassB3 的抗干扰能力高于 GalileoE6C 但略低于 GPSL2C, 授权信号 CompassB3A 的抗干扰能力低于 GPSL2P, GPSL2M 和 GalileoE6PRS. 与 GPSL2P, GPSL2M 和 GalileoE6PRS 相比, CompassB3A 的解调抗窄带干扰能力分别低 2.9, 3.0 和 2.9 dB, 解调抗匹

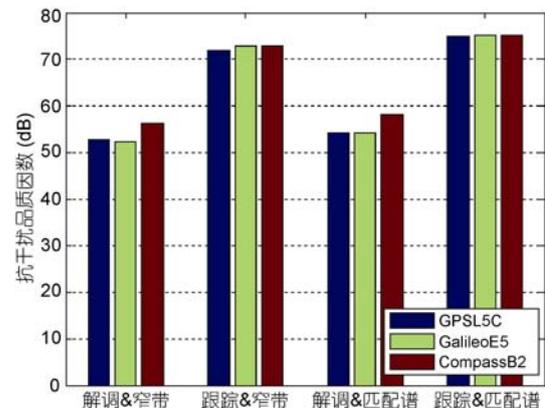


图5 B2频点 Compass 信号与 GPS 和 Galileo 信号的抗干扰能力比较

配谱干扰能力分别低 2.8, 3.1 和 2.9 dB, 码跟踪抗窄带干扰能力分别低 5.0, 2.6 和 3.0 dB, 码跟踪抗匹配谱干扰能力分别低 6.6, 2.9 和 3.2 dB.

3.3 抗多径能力

Compass 导航信号与 GPS 和 Galileo 信号的抗多径能力对比见图 7~11 B1 频点民用信号 COMPASSB1C 与 GPSL1C 和 GalileoE1OS 采用相同的调制方式, 它们具有相同的抗多径能力, 优于 GPSL1C/A; B1 频点授权信号 CompassB1 的抗多径能力比 GPSL1P 和 GPSL1M 好, 略差于 GalileoE1PRS; B2 频点授权信号 CompassB2 与 GalileoE5 采用相同的调制方式, 它们具有相同的抗多径能力, 优于 GPSL5C; B3 频点授权信号 CompassB3 的抗多径能力优于 GPSL2C 和 GalileoE5C; B3 频点授权信号 CompassB3A

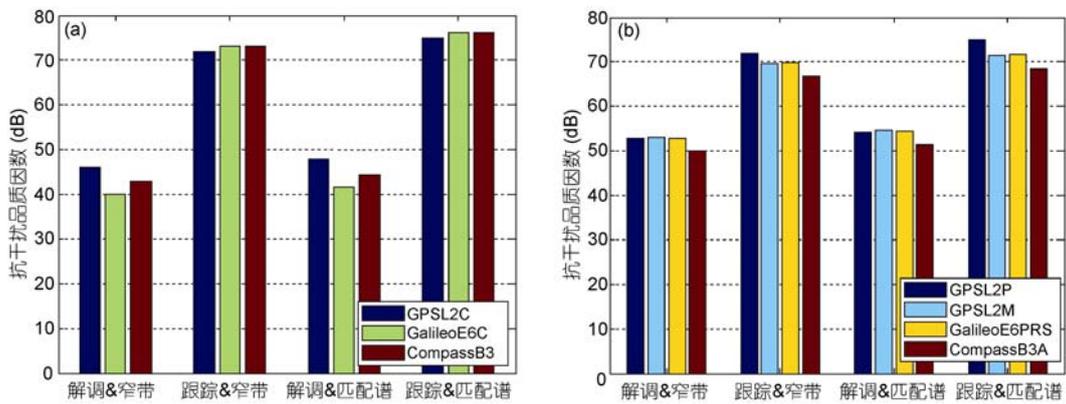


图6 B3频点 Compass 信号与 GPS 和 Galileo 信号的抗干扰能力比较
(a) 民用信号; (b) 授权信号

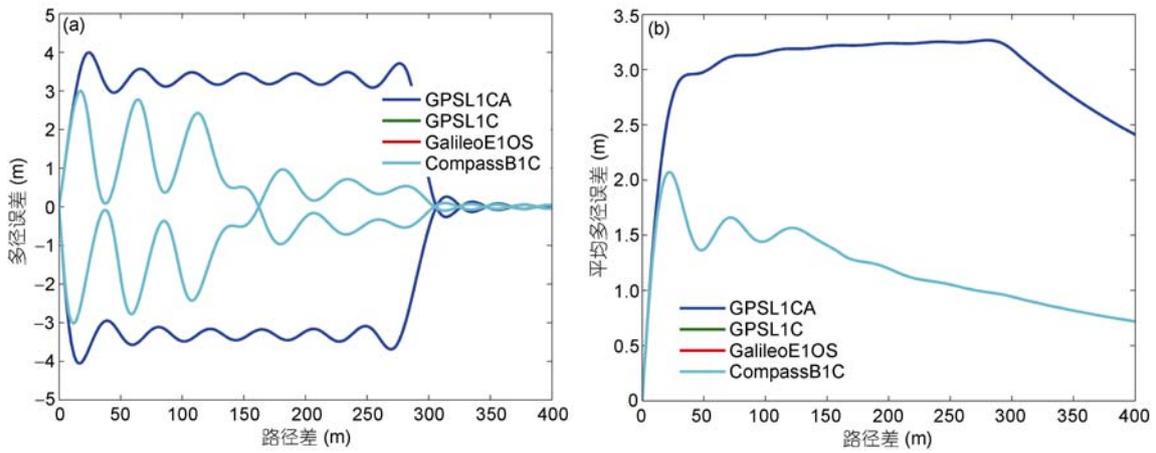


图7 B1频点 Compass 民用信号与 GPS 和 Galileo 信号的抗多径能力比较
(a) 多径误差包络; (b) 平均多径误差

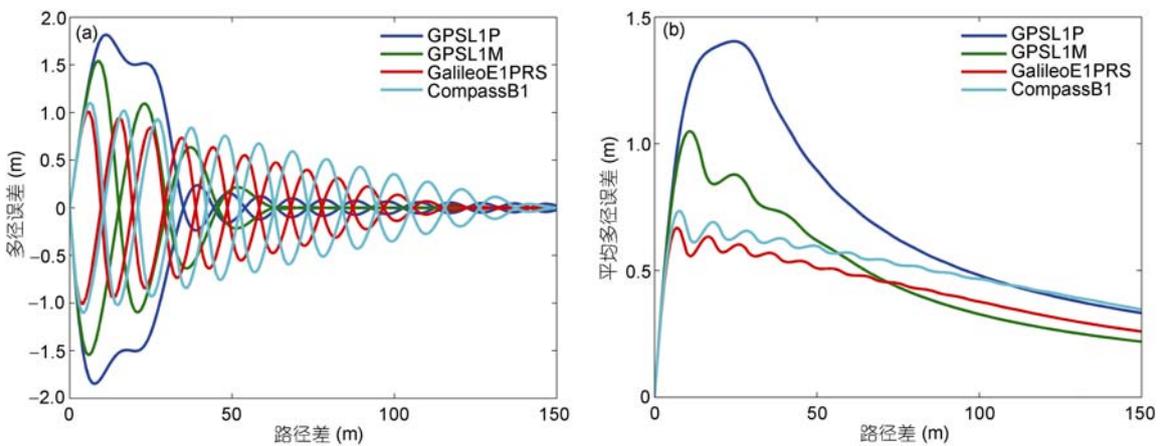


图8 B1频点 Compass 授权信号与 GPS 和 Galileo 信号的抗多径能力比较
(a) 多径误差包络; (b) 平均多径误差

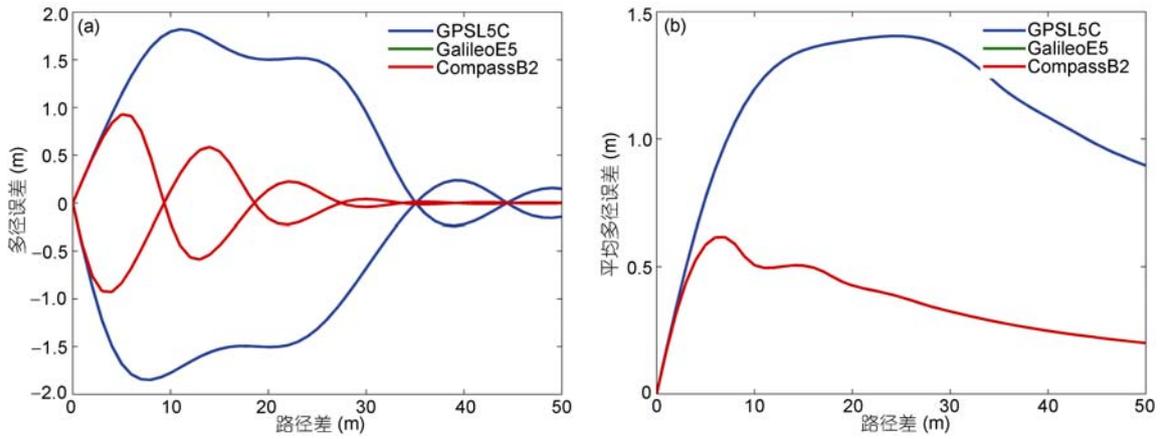


图9 B2 频点 Compass 民用信号与 GPS 和 Galileo 信号的抗多径能力比较

(a) 多径误差包络; (b) 平均多径误差

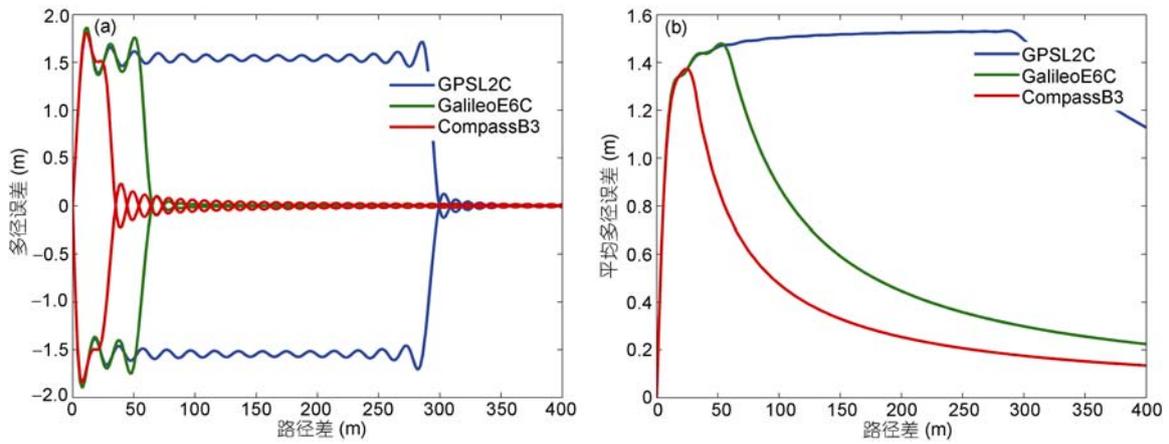


图10 B3 频点 Compass 民用信号与 GPS 和 Galileo 信号的抗多径能力比较

(a) 多径误差包络; (b) 平均多径误差

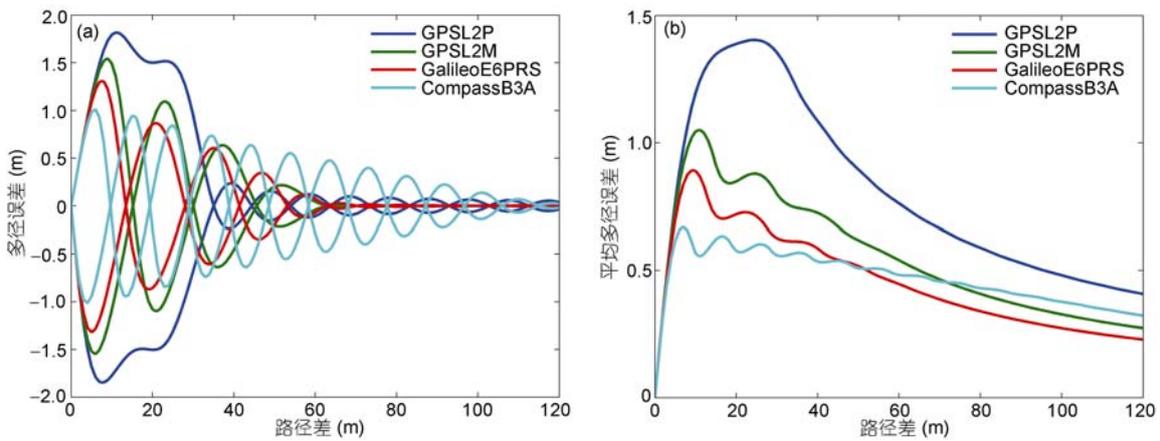


图11 B3 频点 Compass 授权信号与 GPS 和 Galileo 信号的抗多径能力比较

(a) 多径误差包络; (b) 平均多径误差

的抗多径能力优于 GPSL2P, GPSL2M 和 Galileo-E6PRS.

3.4 兼容性

基于谱分离系数和有效载噪比衰减的兼容性分析详细结果见另一篇论文“Compass 系统导航信号的兼容性研究”, 本文不再重复叙述. 下面给出基于谱安全指数和码跟踪谱安全指数的分析结果.

表4和5分别为 B1 频点 Compass, GPS 和 Galileo 授权信号的谱安全指数和码跟踪谱安全指数. 当干扰目标为民用信号时, 谱安全指数最低的是 GPSL1P(5.0 dB), 码跟踪谱安全指数最低的也是 GPSL1P(3.2 dB). 主要原因在于, GPSL1P 的谱瓣位于中心频率附近, 与民用信号的分离程度较小. 对于 CompassB1, GPSL1M 和 GalileoE1PRS, 当干扰目标为民用信号时, 谱安全指数均在 16 dB 以上, 谱安全指数均在 11 dB 以上. 这说明, 授权信号的谱分离, 给授权信号的谱安全性带来了很大的改善. 当干扰目标为其他系统的授权信号时, GPSL1M 的最小谱安

全指数为 12.9 dB, GalileoE1PRS 的最小谱安全指数为 2.5 dB, 而 CompassB1 仅有 1.9 dB; GPSL1M 的最小码跟踪谱安全指数为 11.1 dB, GalileoE1PRS 的最小谱安全指数为 3.1 dB, 而 CompassB1 仅有 1.5 dB.

表6和7分别为 B3 频点 Compass、Galileo 授权信号的谱安全指数和码跟踪谱安全指数. GPSL2 信号与 Compass 和 Galileo 信号无谱重叠, 不加以考虑. 表中的数据显示, 当干扰目标信号为 CompassB3 时, GalileoE6PRS 的谱安全指数仅为 2.0 dB, 码跟踪谱安全指数为 -2.4 dB. 这意味着, 该频点上 Galileo 信号在安全性方面处于不利地位.

4 结论

通过上述对比分析, 可以得到如下结论:

(i) 对于民用信号, Compass 的性能最佳. 由于吸取了 GPS 和 Galileo 的经验, Compass 在 B1 和 B2 频点的民用信号性能与 Galileo 相当; B3 频点 QPSK(10)信号若作为民用, 可获得优于 GPSL2C 和 GalileoE5C 的性能.

表4 B1 频点 Compass 授权信号与对应 GPS 和 Galileo 信号的谱安全指数

有用信号	干扰目标信号							
	L1CA	L1P	L1M	L1C	E1OS	E1PRS	B1C	B1
GPSL1P	8.1	0.0	8.2	5.0	5.0	18.0	5.0	14.6
GPSL1M	25.3	8.5	0.0	16.6	16.5	18.3	16.5	12.9
GalileoE1PRS	37.3	15.2	15.2	28.9	25.9	0.0	25.9	2.5
CompassB1	28.2	11.2	9.3	20.1	19.9	1.9	19.9	0.0

表5 B1 频点 Compass 授权信号与对应 GPS 和 Galileo 信号的码跟踪谱安全指数

有用信号	干扰目标信号							
	L1CA	L1P	L1M	L1C	E1OS	E1PRS	B1C	B1
GPSL1P	10.3	0.0	6.4	5.1	3.2	7.1	3.2	5.4
GPSL1M	17.4	9.9	0.0	13.0	11.2	16.2	11.2	11.1
GalileoE1PRS	25.0	12.0	17.6	21.4	15.8	0.0	15.8	3.1
CompassB1	21.1	8.7	10.9	17.9	15.4	1.5	15.4	0.0

表6 B3 频点 Compass 授权信号与对应 GPS 和 Galileo 信号的谱安全指数

有用信号	干扰目标信号			
	GalileoE6C	GalileoE6PRS	CompassB3	CompassB3A
GalileoE6PRS	17.2	0.0	2.0	19.0
CompassB3A	15.1	16.1	12.3	0.0

表7 B3 频点 Compass 授权信号与对应 GPS 和 Galileo 信号的码跟踪谱安全指数

有用信号	干扰目标信号			
	GalileoE6C	GalileoE6PRS	CompassB3	CompassB3A
GalileoE6PRS	10.6	0.0	-2.4	21.7
CompassB3A	8.7	14.5	7.7	0.0

(ii) 对于授权信号,在精度和抗多径能力方面,Compass 在 B1 频点居中, B3 频点最佳。但是,在抗干扰能力方面,Compass 在 B1 频点和 B3 频点均低于 GPS 和 Galileo。这意味着 Compass 系统在未来的特殊条件下处于劣势。建议适当提高授权信号的码速率,改善抗干扰能力。

(iii) 受频谱资源限制,Compass 授权信号与 Galileo 授权信号的谱重叠程度较大,谱安全性较低。建议从技术和非技术两个层面与 Galileo 共同寻找更优的解决方案,在不降低性能的条件同时尽可能改善谱安全性,提高频谱利用率。另一方面,应尽早研究和开发其他频率资源(如 C 频段),掌握未来的主动权。

参考文献

- 1 Hein G W, Avila-Rodriguez J A, Wallner S, et al. MBOC: The new optimized spreading modulation recommended for GALILEO L1 OS and GPS L1C. In: Proceedings of IEEE/ION PLANS 2006. Virginia: Institute of Navigation, 2006. 883—892
- 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. In: ION GNSS 20th International technical Meeting of the Satellite Division. Virginia: Institute of Navigation, 2007. 1516—1529
- 3 Wallner S, Hein G W, Avila-Rodriguez J A. Interference computations between several GNSS systems. In: Proceedings of ESA Navitec 2006. Noordwijk: The Netherlands, 2006
- 4 Wallner S, Hein G W, Pany T, et al. Interference computations between GPS and GALILEO. In: ION GNSS 18th International Technical Meeting of the Satellite Division. Virginia: Institute of Navigation, 2005. 861—876
- 5 Spilker Jr J J. Signal Structure and Theoretical Performance. In: Global Positioning System: Theory and Applications, Volume I. Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol. 163. Washington: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1996
- 6 Irsigler M, Rodriguez J A A, Hein G W. Criteria for GNSS multipath performance assessment. In: ION GNSS 18th International Technical Meeting of the Satellite Division. Virginia: Institute of Navigation, 2005. 2166—2177
- 7 Betz J W. Effect of narrowband interference on GPS code tracking accuracy. In: ION NTM 2000. Virginia: Institute of Navigation, 2000. 16—27
- 8 唐祖平. GNSS 信号设计与评估若干理论研究. 博士学位论文. 武汉: 华中科技大学, 2009
- 9 唐祖平, 胡修林, 黄旭方. 卫星导航信号设计中的抗多径性能分析. 华中科技大学学报. 2009, 37(5): 1—4
- 10 Soualle F, Burger T. Radio frequency compatibility criterion for code tracking performance. In: ION GNSS 20th International Technical Meeting of the Satellite Division. Virginia: Institute of Navigation, 2007. 1201—1210

Research on performance evaluation of Compass signal

TANG ZuPing^{1*}, ZHOU HongWei², HU XiuLin¹, RAN YiHang¹, LIU YuQi¹
& ZHOU YanLin¹

¹ Department of Electronics and Information Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

² Beijing Institute of Tracking and Telecommunication Technology, Beijing 100094, China

Signal structure is critical to the inherent performance of global navigation satellite system (GNSS), and it is one of decisive factors which must be investigated during system designing and upgrading course. This paper presents a kind of performance evaluation method, and evaluates the Compass signal performance. The method includes four aspects such as accuracy, anti-jamming, anti-multipath and compatibility. They are scaled with Gabor bandwidth, anti narrowband jamming merit factor and anti matched spectrum jamming merit factors for demodulation processing, anti narrowband jamming merit factor and anti matched spectrum jamming merit factors for code tracking processing, multipath error envelope, running average of multipath error envelope, spectral separation coefficient, Spectral Safety Index. Based on the newest publicized signal structure, Compass signal performance was compared with GPS and Galileo. Analysis result shows that, the open service of Compass signal performance is the best. For the authorized service, Compass signal is comparable to Galileo, better than GPS in accuracy and anti-multipath aspect, but the anti-jamming performance is worse than GPS and Galileo. This indicates that Compass will be disadvantageous under special condition in future. Finally, an optimization suggestion is given.

GNSS, signal structure, Compass, GPS, Galileo

PACS: 91.10.Fc, 84.40.Ua, 06.20.Dk, 06.30.Ft, 07.05.Tp