新型 GNSS 信号波形设计

宿晨庚 郭树人 周鸿伟

(北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094)

摘 要: 在发射带宽严格受限的约束下连续函数波形信号较传统矩形波形表现出了较高的频谱利用率优势和优良性能,很有可能应用到未来的全球卫星导航系统(GNSS,Global Navigation Satellite System)信号体制中.在建立导航信号波形设计准则的理论模型基础上,研究了7种可能适用于未来GNSS系统的新型信号波形,在典型的宽/窄发射带宽条件下,通过仿真评估了传统GNSS信号和新型GNSS信号的精度、抗多径、抗干扰等性能,优选出BOCc和MSK两种适用于不同环境的信号波形:在频谱资源充足的情况下,BOCc信号具有最优的导航性能;在频率资源受限的情况下,MSK信号兼容性好,抗干扰能力强,拥有较好的导航性能.最后,结合两类信号波形的优缺点提出了我国新一代卫星导航系统信号波形设计的建议.

关 键 词: GNSS; 信号波形设计; MSK 调制; 跟踪精度; 抗干扰性能

中图分类号: TN 96

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2012)12-1676-06

New signal waveforms design for GNSS

Su Chengeng Guo Shuren Zhou Hongwei

(Beijing Institute of Tracking and Telecommunication Technology, Beijing 100094 , China)

Abstract: Continuous function waveforms will probably be adopted by future global navigation satellite system(GNSS) signals in bandwidth limitation situation due to their higher spectrum efficiency and better performance. In order to find new signal waveform solution for future GNSS, design criteria of navigation signal waveforms were established, and several waveforms appropriate for future GNSS were explored. The characteristics of traditional and new signals were simulated and compared, code tracking noise, anti-multipath and anti-interference performances were evaluated. It was find that BOCc and MSK applicable to different bandwidths outperform other signal waveforms: BOCc has better performance in wide-band situation, and MSK has better performance in band limit situation; thus the two waveforms were proposed for new generation GNSS signal design.

Key words: global navigation satellite system(GNSS); waveform design; minimum shift keying(MSK) modulation; tracking accuracy; anti-interference performance

导航调制信号波形或基带信号波形是导航信号体制设计中的关键环节,信号波形通过影响导航信号的自相关函数和功率谱,进而影响导航信号性能.

导航信号的调制信号波形可以分为矩形波和连续函数波形两种,矩形波实现简单但已调信号在码片之间的相位不连续.虽然在GPS(Global Positioning System)现代化以及Galileo系统设计过程中均抛弃了LOC,RC等连续函数波形,而采用较容易实现的BPSK(Binary Phase Shift Keying),BOC(Binary Offset Carrier),AltBOC(Alternative BOC modulation),MBOC(Multiplexed Binary Offset Carrier modulation)等矩形波,但是没有一种波形适用于所有环境.目前L频段GNSS(Global

收稿日期: 2011-09-12; **网络出版时间**:2012-11-09 17:19

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20121109.1719.005.html

作者简介: 宿晨庚(1988-),男,河北辛集人,硕士生,hancecilia@126.com.

Navigation Satellite System)信号已经非常拥挤,Galileo 系统已经计划在 C 波段设计新的导航信号,并初步提出了信号体制规划[1-2],由于必须满足航空无线电和微波着陆系统的带外辐射功率限制,Galileo 系统在 C 波段计划使用 GMSK(Gauss-MSK)信号. 随着技术的发展,MSK(Minimum Shift Keying), GMSK, PSWF (Prolate Spheroidal Wave Functions)等连续函数波形将有可能在未来频谱拥挤的环境中体现出其性能优势.

本文首先建立导航信号的设计准则,分析了几种可能适用于未来 GNSS 导航信号体制的信号波形,并对传统的 GNSS 信号波形以及新型 GNSS 信号波形进行性能仿真分析,优选出适用于 GNSS 且性能优良的 BOCc 和 MSK 两种信号波形,并给出新一代卫星导航信号波形设计的建议.

1　导航信号波形设计准则

卫星发射信号的数学模型可以表示为[3]

$$s(t)=\sqrt{2P}\left[D(t)\sum_{k=-\infty}^{\infty}c_k p(t-kT_c)\right]\cdot \cos(2\pi f_c t+\varphi) \tag{1}$$

其中,P 为发射功率;$D(t)$ 为导航电文;$\{c_k\}$ 为扩频码序列;$p(t-kT_c)$ 为码片 c_k 内的调制信号波形,T_c 为码片时长.

导航信号体制对系统性能的影响主要体现在码跟踪精度、抗干扰、抗多径能力等方面[4].

1) 码跟踪精度.

导航接收机中热噪声引起的码跟踪误差是主要的测距误差源,相干环路码跟踪误差下限可以表示为

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

其中,B_L 为环路带宽;C/N_0 为载噪比;$\Delta\omega$ 为 Gabor 带宽.

在相同的接收机环路带宽和接收载噪比的情况下,码跟踪精度只与 Gabor 带宽有关,因此可以用 Gabor 带宽来表征信号的码跟踪精度:Gabor 带宽越大则精度越高. Gabor 带宽表示为

$$\Delta\omega=2\pi\sqrt{\int_{-\beta/2}^{\beta/2}f^2G_s(f)\,\mathrm{d}f} \tag{3}$$

其中,$G_s(f)$ 为信号的归一化功率谱密度;β 为接收机前端带宽.

2) 抗多径.

多径误差是测距误差中的系统误差,难以通过差分技术和数学建模的方式消除,但可以通过信号优化设计来减小多径影响. 采用基于超前减滞后鉴别算法的码跟踪多径误差包络[5]以及平均多径误差来表征信号的抗多径能力. 多径误差包络是指在某个多径延迟所对应的最大多径误差值,平均多径误差是多径误差包络随多径延迟的累积平均值.

3) 抗干扰.

对卫星导航威胁最大的干扰信号主要包括窄带干扰和匹配谱干扰. 考虑到接收机的信号处理环节,又可以将干扰分为码跟踪抗窄带干扰、码跟踪抗匹配谱干扰、解调抗窄带干扰、解调抗匹配谱干扰等. 导航信号的抗干扰能力用抗干扰品质因数[4]定量表示,品质因数越大,表明该环节对相应干扰的抑制能力越强.

码跟踪抗窄带品质因数:

$$Q_{CN}=10\times\lg\left(\frac{\int_{-\beta/2}^{\beta/2}f^2G_s(f)\,\mathrm{d}f}{\mathrm{MAX}[f^2G_s(f)]}\right) \tag{4}$$

解调抗窄带品质因数:

$$Q_{DN}=10\times\lg\left(\frac{1}{R_d\times\mathrm{MAX}[G_s(f)]}\right) \tag{5}$$

码跟踪抗匹配谱品质因数:

$$Q_{CM}=10\times\lg\left(\frac{\int_{-\beta/2}^{\beta/2}f^2G_s(f)\,\mathrm{d}f}{\int_{-\beta/2}^{\beta/2}f^2G_s^2(f)\,\mathrm{d}f}\right) \tag{6}$$

解调抗匹配谱品质因数:

$$Q_{DM}=10\times\lg\left(\frac{1}{R_d\times\int_{-\beta/2}^{\beta/2}G_s^2(f)\,\mathrm{d}f}\right) \tag{7}$$

式中,R_d 表示导航电文速率;$G_s(f)$ 为信号的归一化功率谱密度;β 为接收机前端带宽.

2　信号波形选择

事实上,适用于卫星通信的信号均能应用于卫星导航,但导航信号波形选取不同于通信信号波形,通信信号关注于误码率、通信容量、频谱利用率等性能,导航测距精度和抗多径性能是导航信号设计的重点. 本文给出几种可能应用于卫星导航中的调制信号波形.

1) BPSK 调制.

BPSK 是传统的 GNSS 信号的调制波形,每个码片内电平恒定,实现方式简单,其一个码片内的调制信号波形为

$$p_{BPSK}(t)=\begin{cases}1 & 0\leqslant t\leqslant T_c\\ 0 & \text{else}\end{cases} \tag{8}$$

2) BOC 调制.

BOC[6]信号通过在 BPSK 的基础上调制方波

副载波,实现频谱分离,其具体实现包括余弦相位副载波 BOCc 和正弦相位副载波 BOCs 两种:

$$p_{\mathrm{BOCc}(m,n)}(t)=p_{\mathrm{BPSK}(n)}(t)\times\mathrm{sign}\left[\cos\left(\frac{2\pi mt}{nT_c}\right)\right] \tag{9}$$

$$p_{\mathrm{BOCs}(m,n)}(t)=p_{\mathrm{BPSK}(n)}(t)\times\mathrm{sign}\left[\sin\left(\frac{2\pi mt}{nT_c}\right)\right] \tag{10}$$

其中,sign 表示取符号.

3) LOC(Linear Binary Offset Carrier)调制.

LOC 调制在 BPSK 信号上调制一个正弦信号子载波,实现频谱搬移. 其一个码片内的调制信号波形为

$$p_{\mathrm{LOC}(m,n)}(t)=p_{\mathrm{BPSK}(n)}(t)\times\sin\left(\frac{2\pi mt}{nT_c}\right) \tag{11}$$

4) MSK 调制.

最小频移键控 MSK[7] 是二进制连续相位 FSK(CPFSK)的一种特例,调制指数 $h=0.5$. MSK 是 Galileo C 频段备选信号之一.

MSK 可以看作是正弦脉冲成形的 OQPSK,其中 I 支路码片波形表示为

$$p_{\mathrm{MSK}}(t)=\begin{cases}\cos\left(\dfrac{\pi t}{2T_c}\right) & 0\leqslant t\leqslant 2T_c\\ 0 & \text{else}\end{cases} \tag{12}$$

5) GMSK 调制.

GMSK 是在 MSK 调制器之前加入一个高斯低通滤波器,减小信号带外辐射功率. Galileo 系统在 C 波段的卫星导航信号规划中使用了 BT 值为 0.3 的 GMSK 信号,以满足 C 波段极为苛刻的带外辐射功率要求.

6) 升余弦波形(rising cosine).

升余弦信号波形可以表示为 BPSK 时域信号与升余弦滤波器时域函数的卷积:

$$p_{\mathrm{RC}}(t)=p_{\mathrm{BPSK}}(t)*h_{\mathrm{RC}}(t) \tag{13}$$

定义滚降系数 $\beta=0.3$ 时升余弦波形为 RC,是 Galileo C 波段信号规划中的备选方案之一.

本文针对以上几种信号类型,设计 BPSK(10),RC(10),MSK(10),GMSK(10),BOCc(5,5),BOCs(5,5),LOC(5,5)等 7 种主瓣宽度近似相同的信号波形进行性能对比分析.

3 信号波形性能评估

3.1 归一化功率谱

7 种信号波形的归一化功率谱密度如图 1 所示. RC(10),MSK(10),GMSK(10),LOC(5,5)的调制信号波形为连续函数,发射信号的功率谱功率集中在主瓣,旁瓣功率快速衰减,频谱利用率较高,适用于对带外辐射功率严格限制的应用环境下(例如 Galileo C 波段信号);BOCc(5,5),BOCs(5,5),LOC(5,5)信号的功率谱为分裂谱形式,可以应用于需要实现频谱分离的授权服务;BOCc 具有更多的高频分量,旁瓣能量较多,在宽带接收的情况下性能较优;MSK 的能量集中在主瓣,主瓣带宽为 BPSK 信号的 1.5 倍,在频率带限和窄带接收的情况下性能较优.

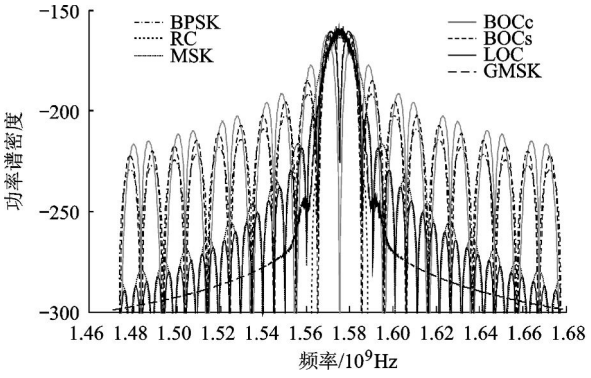


图 1 归一化功率谱

3.2 自相关函数

7 种信号波形的自相关函数如图 2 所示. BOCc 信号自相关峰最尖锐,信号精度最高;MSK,BPSK 有唯一的相关峰;BOCc,BOCs,LOC 信号有较大的虚假峰,不利于接收机的准确捕获;RC 和 GMSK 信号由于时域信号波形扩展到一个码片之外,其自相关函数非零区时延将向码片外扩展,时延大于码片的多径信号也可能会对接收造成影响.

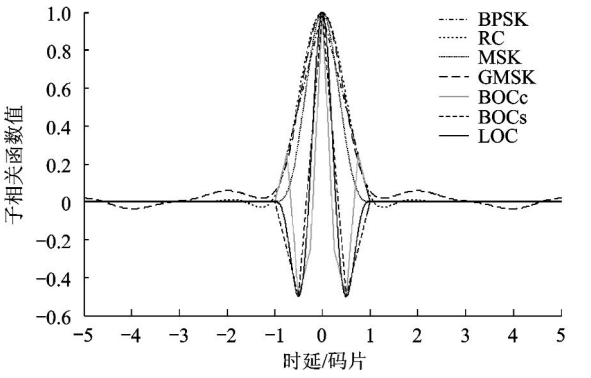


图 2 自相关函数

3.3 性能评估

由于信号测距精度与 Gabor 带宽相关,理论上只要信号带宽无穷大,测距精度就会无限增加,但是实际中由于频谱资源限制和工程实现约束等因素,卫星所发射的导航信号往往是带限的. 因此,在对信号波形进行性能评估时需要考虑到发射带宽的限制. 本文设定两种代表性评估环境,分

别为发射带宽较宽的 40.92 MHz(如 L1 频段)和发射带宽受限的 20.46 MHz(如 C 频段),对 7 种信号波形的码跟踪精度、抗多径、抗干扰性能进行评估.

3.3.1　评估环境一

星上信号发射带宽 40.92 MHz,接收带宽 0 ~ 40.92 MHz,接收信号载噪比 20 ~ 50 dB-Hz,多径直达幅度比(MDR)-6 dB,多径时延路径差 0 ~ 300 m,接收机码环带宽为 1 Hz.

1) 码跟踪精度.

分别仿真 7 种信号的 Gabor 带宽和码跟踪误差,如图 3、图 4 所示. Gabor 带宽与接收机前端带宽有关,在接收带宽较小时,Gabor 带宽随接收机带宽的改变较大,当接收带宽大于 35 MHz 时,Gabor 带宽趋于稳定,由大到小的顺序为:BOCc > BOCs>LOC>MSK>BPSK>GMSK>RC,表 1 为接收带宽为 40.92 MHz 时的 Gabor 带宽值.

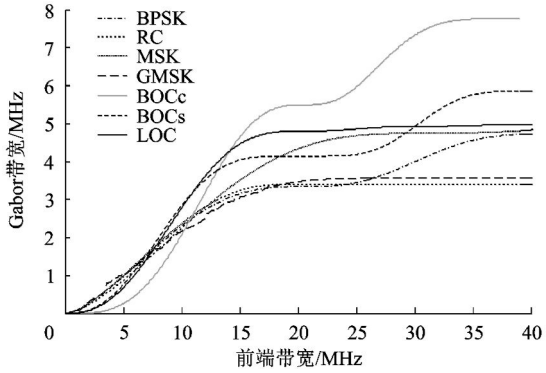


图 3　评估环境一 Gabor 带宽

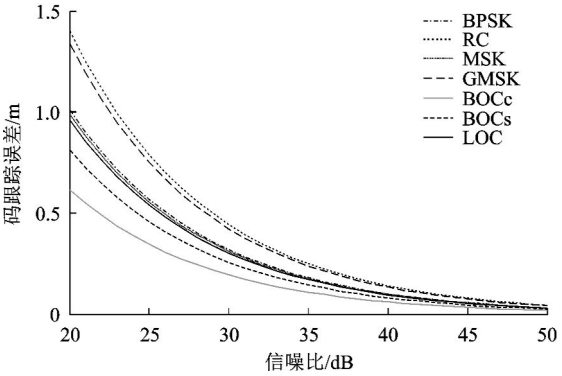


图 4　评估环境一 码跟踪误差

表 1　Gabor 带宽最大值　　MHz

波形	BPSK	RC	MSK	GMSK	BOCc	BOCs	LOC
Gabor 带宽	4.7249	3.4042	4.8387	3.5697	7.7698	5.8639	4.9812

2) 抗多径性能.

分析 7 种信号波形在相关器间隔趋于 0 时的多径误差包络下界和平均多径误差,如图 5、图 6 所示. 当多径时延小于 0.5 个码片时,BPSK 多径误差包络最小,多径时延在 0.5 ~ 1 个码片周期内,BOCc 多径误差包络最小,RC 多径误差包络最大. 表 2 为最大平均多径误差,若以最大平均多径误差来评判 7 种信号波形的平均抗多径能力,抗多径能力顺序为:BOCc>BPSK = BOCs >MSK> LOC >GMSK >RC.

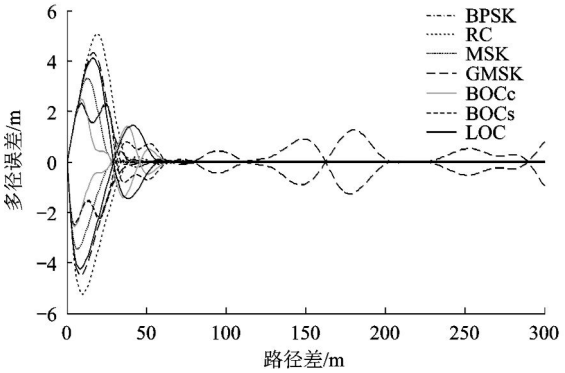


图 5　评估环境一 多径误差包络

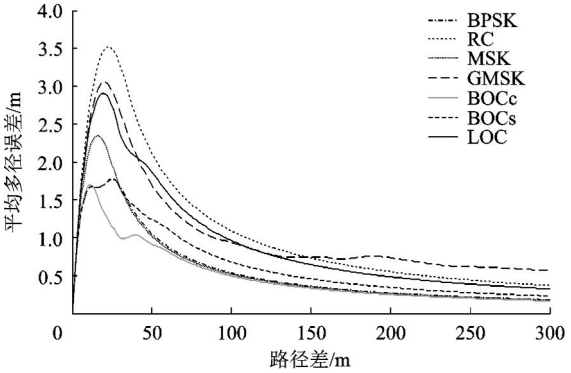


图 6　评估环境一 平均多径误差

表 2　最大平均多径误差　　m

波形	BPSK	RC	MSK	GMSK	BOCc	BOCs	LOC
误差	1.77	3.52	2.35	3.05	1.70	1.77	2.90

3) 抗干扰性能.

7 种信号的抗干扰性能如表 3 所示,MSK 信号的解调环节抗干扰性能最优,BPSK 的码跟踪环节抗干扰性能最优,GMSK 的解调抗窄带干扰、码跟踪抗窄带干扰、解调抗匹配谱干扰能力最差,LOC 信号码跟踪抗匹配谱干扰最差.

表 3　抗干扰品质因数　　dB

干扰	波形						
	BPSK	RC	MSK	GMSK	BOCc	BOCs	LOC
1 *	52.8861	52.6538	54.0106	44.5434	53.0921	52.5587	52.7488
2 *	73.1091	70.0294	71.8506	65.3948	71.8057	71.8597	69.5916
3 *	54.4258	53.9732	55.4041	51.4774	55.0099	54.1996	54.1049
4 *	76.2343	73.2724	75.0834	72.4295	73.6251	73.9590	71.7880

注:1 * 解调抗窄带干扰;2 * 码跟踪抗窄带干扰;3 * 解调抗匹配谱干扰;4 * 跟踪抗匹配谱干扰.

3.3.2　评估环境二

信号发射带宽 20.46 MHz,接收带宽 0 ~

20.46 MHz,接收信号载噪比 20 ~ 50 dB-Hz,多径直达幅度比(MDR)-6 dB,多径时延路径差 0 ~ 300 m,接收机码环带宽为 1 Hz.

1)码跟踪精度.

分别仿真 7 种信号的 Gabor 带宽和码跟踪误差,如图 7、图 8 所示. 在指定接收带宽下,码跟踪误差与信号载噪比成反比. 在接收带宽较小时,Gabor 带宽随接收机带宽改变较大,当接收带宽大于 18 MHz 时,Gabor 带宽趋于稳定,表 4 为接收带宽是 20.46 MHz 时的 Gabor 带宽值,由大到小的顺序为:BOCc>LOC > MSK>BOCs > GMSK > BPSK >RC. 在发射带宽受限的情况下,连续函数波信号由于其良好的旁瓣抑制效果,Gabor 带宽受影响程度较小.

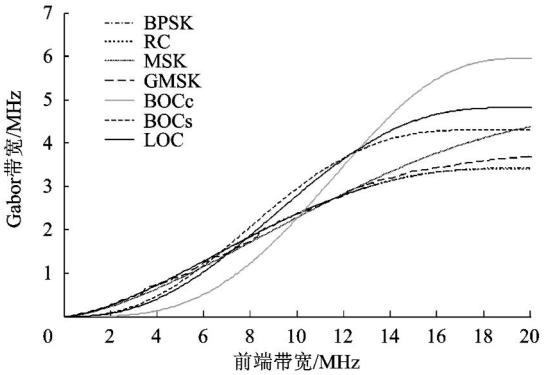


图 7 评估环境二 Gabor 带宽

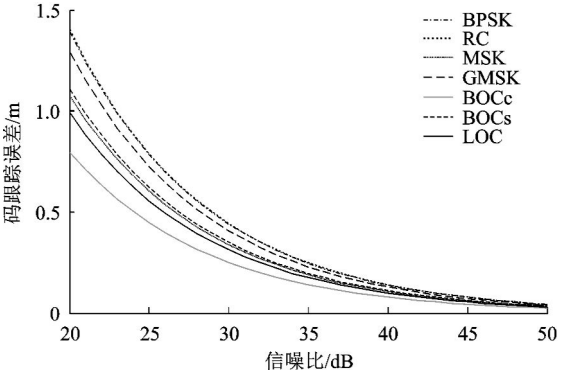


图 8 评估环境二 码跟踪误差

表 4 Gabor 带宽 MHz

波形	BPSK	RC	MSK	GMSK	BOCc	BOCs	LOC
Gabor 带宽	3.427 1	3.401 8	4.451 3	3.693 5	6.001 4	4.311 3	4.824 1

2)抗多径性能.

分析 7 种信号波形在相关器间距趋于 0 时的多径误差包络下界和平均多径误差,如图 9、图 10 所示. 在一个码片周期内,当路径差小于 20 m 或大于 25 m 时,MSK 多径误差包络最小,路径差在 20 ~ 25 m 时,BOCc 多径误差包络最小. 表 5 为最大平均多径误差,若以最大平均多径误差来评判 7 种信号波形的平均抗多径能力,抗多径能力顺序为:BOCc>MSK> GMSK>LOC>BPSK>BOCs > RC. 连续函数波信号由于其良好的频谱利用率特性,受带宽限制的影响较小,在带宽受限的情况下,性能较优.

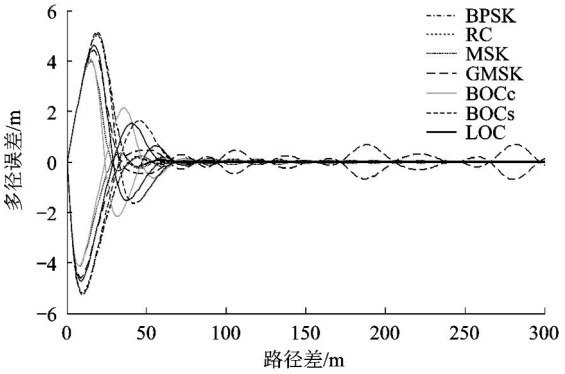


图 9 评估环境二 多径误差包络

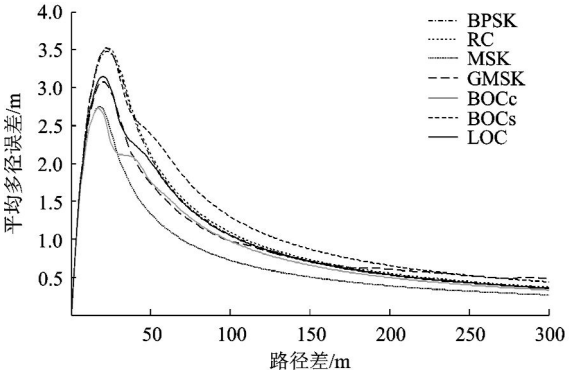


图 10 评估环境二 平均多径误差

表 5 最大平均多径误差 m

波形	BPSK	RC	MSK	GMSK	BOCc	BOCs	LOC
误差	3.48	3.53	2.75	3.08	2.73	3.51	3.15

3)抗干扰性能.

7 种信号在评估环境二的抗干扰性能如表 6 所示,MSK 信号的抗干扰性能最优,GMSK 的解调抗窄带干扰、跟踪抗窄带干扰、解调抗匹配谱干扰能力最差,BOCc 信号跟踪抗匹配谱干扰最差.

表 6 抗干扰品质因数 dB

干扰	波形						
	BPSK	RC	MSK	GMSK	BOCc	BOCs	LOC
1 *	52.665 1	52.653 1	53.889 3	47.062 2	52.324 8	52.219 9	52.706 8
2 *	70.098 8	70.022 4	71.004 6	63.610 9	68.795 5	68.849 4	69.271 4
3 *	53.994 8	53.972 0	55.171 3	52.155 5	53.659 3	53.552 6	54.021 4
4 *	73.341 8	73.264 9	74.209 8	71.268 1	70.715 1	71.008 3	71.430 0

注:1 * 解调抗窄带干扰;2 * 码跟踪抗窄带干扰;3 * 解调抗匹配谱干扰;4 * 跟踪抗匹配谱干扰.

4 综合分析与建议

4.1 综合分析结论

综合上述仿真分析,发射带宽的变化对不同

信号波形的性能影响程度不同,其中,BOCc 和 MSK 信号的综合性能较优. 两种信号主要有如下特点:

1) MSK 和 BOCc 信号波形均具有恒包络特性,信号经过星上高功率放大器(HPA,High-Power Amplifier)不会因为器件的非理想特性而出现非线性失真.

2) MSK 信号的能量集中在主瓣带宽内,旁瓣滚降速度快,带外辐射功率小,频谱利用率高,信号间兼容性好;BOCc 信号功率谱旁瓣辐射功率较大,存在较大的带外干扰.

3) MSK 的自相关函数只存在单一相关峰,有利于接收机捕获,BOCc 信号相关峰更加尖锐,测距精度更高,但存在多个虚假相关峰.

4) 当发射带宽远大于码片速率时,BOCc 信号波形性能最优,当发射带宽与码片频率相当时,MSK 等连续函数波信号的性能相对矩形码片波形将显著提高. 即减小发射带宽与信号码片速率之比、要求更高的谱分离系数都有利于采用连续函数波方案,反之则有利于采用矩形码片的方案.

5) MSK 信号抗干扰性能优于 BOCc 信号.

6) MSK 信号需要在发射端和接收端产生特定波形,对 ADC 和 DAC 量化位数要求比矩形码片要多,接收复杂度有所增加.

7) MSK 信号受接收带宽变化影响较小,而 BOCc 在窄带接收和宽带接收时性能差别较大,接收机可在复杂度和性能间折中考虑,设计较为灵活.

4.2　对我国新一代卫星导航系统信号设计的启示

1) 在带宽非独占和带外抑制要求较低的情况下,尽量选取 BPSK 或 BOC 等矩形码片信号,可以降低接收机复杂度、提高接收机设计的灵活性、获得较优的性能.

2) 在带宽有限或带外抑制要求较高的情况下,信号波形可以选择频谱效率较高、信号间兼容性较好的连续函数波信号,在本文分析的 4 种连续函数波信号中,MSK 调制信号性能最优,且能通过 OQPSK 的形式简单实现.

5　结 束 语

本文在建立导航信号设计准则的基础上,对传统的 GNSS 信号和几种可能应用于未来 GNSS 的新型信号波形的归一化功率谱、自相关函数、码跟踪精度、抗多径、抗干扰能力进行了评估. 在频谱资源充足的情况下,传统的 BOC 信号具有最优的导航性能;在频率资源受限的情况下,MSK 信号由于其良好的带外辐射功率抑制能力,信号间的兼容性较好,抗干扰能力强,拥有较好的导航性能. 在设计 GNSS 信号时可以结合相应频段的频率约束条件合理选择信号波形,达到最佳性能.

致谢　本文得到了寇艳红教授、唐祖平博士的大力支持,感谢两位在本文写作过程中提出的宝贵意见.

参考文献(References)

[1] Rodriguez J A A, Stefan Wallner, Stefan Wallner, et al. Study on a galileo signal and service plan for C-band[C] //ION GNSS International Technical Meeting of the Satellite Division. Savannah: The Institute of Navigation, 2008: 2515-2529

[2] Irisgler M, Hein G W, Schmitz-Peiffer A. Use of C-band frequencies for satellite navigation: benefits and drawbacks[J]. GPS Solution, 2004, 8(3): 119-139

[3] Parkinson B W, Spilker Jr J J. Global positioning system: theory and applications volume1 [M]. Washington DC: American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc, 1996

[4] 唐祖平,周鸿伟,胡修林,等. Compass 导航信号性能评估研究[J]. 中国科学:物理、力学、天文学,2010(5):592-602
Tang Zuping, Zhou Hongwei, Hu Xiulin, et al. Research on perfor-mance evaluation of COMPASS signal [J]. Scientia Sinica: Physica, Mechanica & Astronomica, 2010(5): 592-602 (in Chinese)

[5] 唐祖平,胡修林,黄旭芳. 卫星导航信号设计中的抗多径性能分析[J]. 华中科技大学学报,2009,37(5):1-4
Tang Zuping, Hu Xiulin, Huang Xufang. Analysis of multipath rejection performance in GNSS signal design [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2009, 37(5): 1-4 (in Chinese)

[6] Betz J W. The offset carrier modulation for GPS modernization [C] // Proceedings of the 1999 National Technical Meeting of The Institute of Navigation. San Diego: The Institute of Navigation, 1999: 639-648

[7] Proakis John G. Digital communications[M]. 4th ed. New York: McGraw-Hill, 2000

(编　辑:娄　嘉)