

二进制偏移载波调制信号畸变误差评估指标*

余小游¹,姚丽红¹,黄仰博²,张勇虎²,孙广富²

(1. 湖南大学信息科学与工程学院, 湖南长沙 410012; 2. 国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

摘要:针对三种常见的信号畸变,给出完善的畸变误差评估指标,从而能够全面评估畸变误差。同时采用提出的评估指标对北斗全球系统 B1 频段上的基线信号 BOC(14,2)及 MBOC(6,1,1/11)信号进行评估。所提出的畸变误差评估指标能够用于评估现代卫星导航信号的畸变误差,对现代导航信号体制设计及完好性监测均具有指导意义。

关键词:全球卫星导航系统;BOC 信号;畸变误差;评估指标

中图分类号:TN95 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2016)03-055-06

Distortion error evaluation indexes of binary offset carrier modulation signals

YU Xiaoyou¹, YAO Lihong¹, HUANG Yangbo², ZHANG Yonghu², SUN Guangfu²

(1. College of Information Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410012, China;

2. College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The analytical evaluation indexes for three signal distortion errors of BOC(Binary Offset Carrier) signals were developed. Then the proposed evaluation indexes were used to evaluate the distortion errors of BOC(14,2) and MBOC(6,1,1/11) signals, which were the advised basis signals of BeiDou global satellite navigation system. The proposed distortion error evaluation indexes can be used to evaluate the distortion errors of modern global navigation satellite system signals, and it has directive significance to modern signal design and integrity monitoring.

Key words: global satellite navigation system; binary offset carrier signals; distortion error; evaluation indexes

导航信号畸变会引起接收信号与本地信号不匹配,从而造成测距精度的降低以及产生测距偏差。自1993年全球定位系统(Global Positioning System, GPS)SV19卫星的信号波形畸变发生后,斯坦福大学等研究机构对信号波形畸变进行了相关研究,基于该畸变形式及影响,国际民航组织(International Civil Aviation Organization, ICAO)采用了二阶异常信号模型建模该异常^[1]。多篇文献对二阶异常信号模型引起的误差进行分析,但绝大多数针对的是二进制相移键控(Binary Phase Shift Keying, BPSK)信号,对二进制偏移载波(Binary Offset Carrier, BOC)信号的畸变误差研究刚刚开始^[2-5]。BOC信号自提出,在导航信号体制设计中就占据着举足轻重的地位,随着GPS现代化以及Galileo及北斗全球系统的建设,BOC信号被全面采用^[6-8]。因此,全面评估BOC信号的畸变误差对于导航系统的信号体制设计、完好性评估与监测、接收机稳健设计均有重要的

指导意义。

文献[9-11]对BOC信号的畸变误差进行研究,但并没有系统的评估指标和分析方法,采用的多是数值仿真的方法。基于数值仿真的方法虽然能够得到在某些参数条件下的畸变误差,但数值仿真的方法不能从数学原理上揭示BOC信号与畸变误差的本质关系;能够用于特定参数下的畸变误差评估,但是无法对畸变误差做全面本质的评估,更加难以指导畸变误差理论分析与接收机抗畸变误差的设计。另一方面,现在对于BOC信号畸变误差的评估仍然没有建立统一的评估方法和指标体系,基本可以认为从理论上给出相应的评估方法和体系的研究还是一片空白,因此,非常有必要全面分析BOC信号的畸变误差,给出一套畸变误差评估方法及评估指标,用于辅助指导现代化导航信号的体制设计、完好性监测评估及接收机稳健设计等。

* 收稿日期:2015-04-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61403413,61371115)

作者简介:余小游(1969—),男,湖南岳阳人,副教授,博士,硕士生导师,E-mail: yuxiaoyou@hnu.edu.cn

1 BOC 信号畸变模型

BOC 信号畸变模型包括三种:数字畸变模型(Threat Model A, TMA)、模拟畸变模型(Threat Model B, TMB)、数字-模拟畸变模型(Threat Model C, TMC) [11]。

文中 BOC 信号是指方波副载波频率为 $f_s = u \times 1.023 \text{ MHz}$, 扩频码频率为 $f_c = v \times 1.023 \text{ MHz}$ 的 BOC 调制信号;其中 u, v 为调制参数, n 为一个伪码码片内的方波副载波的半周期数, 取值为 $2f_s/f_c$ 。

1.1 数字畸变

数字畸变下的 BOC 信号可表示为:

$$r(t) = s(t) + d(t - \tau_d) \quad (1)$$

其中, $s(t)$ 为理想 BOC 信号, $d(t)$ 为数字畸变信号中的畸变量。其中 τ_d 为:

$$\tau_d = \begin{cases} \Delta, & \text{当 } n \text{ 为偶数、伪码符号为 } +1 \text{ 时} \\ \Delta - T_{sc}, & \text{当 } n \text{ 为偶数、伪码符号为 } -1 \text{ 时} \\ \Delta - 2T_{sc}, & \text{当 } n \text{ 为奇数时} \end{cases} \quad (2)$$

其中, Δ 为数字畸变量, T_{sc} 为副载波周期。

假设 BOC 调制信号的伪码序列为理想的伪随机序列, 参考文献[11]可推导出 BOC 数字畸变信号与理想 BOC 信号的互功率谱函数为:

$$P_{rs}(f) = P_s(f) + e^{-j2\pi\tau_d} P_{sd}(f) \quad (3)$$

其中, $P_{sd}(f)$ 为畸变量与理想 BOC 信号的互功率谱函数, 解析表达式为:

$$P_{sd}(f) = \begin{cases} \sin(\pi f \Delta) f_c \left| \frac{\sin\left(\frac{\pi f}{f_c}\right)}{\pi f \cos\left(\frac{\pi f}{2f_s}\right)} \right|^2, & \text{当 } n \\ \quad \text{为偶数、伪码符号为 } +1 \text{ 时} \\ f_c \frac{\sin(\pi f \Delta) \sin\left(\frac{n-2\pi f}{n f_c}\right) \sin\left(\frac{\pi f}{f_c}\right)}{\left| \pi f \cos\left(\frac{\pi f}{2f_s}\right) \right|^2}, & \text{当 } n \\ \quad \text{为偶数、伪码符号为 } -1 \text{ 时} \\ f_c \frac{\sin(\pi f \Delta) \sin\left(\frac{n-2\pi f}{n f_c}\right) \sin\left(\frac{\pi f}{f_c}\right)}{\left| \pi f \cos\left(\frac{\pi f}{2f_s}\right) \right|^2}, & \text{当 } n \\ \quad \text{为奇数时} \end{cases} \quad (4)$$

$P_s(f)$ 为理想 BOC 信号的功率谱函数, 对于正弦相位的 BOC 信号, 其解析表达式为:

$$P_s(f) = \begin{cases} f_c \left(\frac{\tan\left(\frac{\pi f}{2f_s}\right) \sin\left(\frac{\pi f}{f_c}\right)}{\pi f} \right)^2, & \frac{u}{v} \text{ 为偶数} \\ f_c \left(\frac{\tan\left(\frac{\pi f}{2f_s}\right) \cos\left(\frac{\pi f}{f_c}\right)}{\pi f} \right)^2, & \frac{u}{v} \text{ 为奇数} \end{cases} \quad (5)$$

对于余弦相位的 BOC 信号, 其解析表达式为:

$$P_s(f) = \begin{cases} 4f_c \left(\frac{\sin^2\left(\frac{\pi f}{4f_s}\right) \sin\left(\frac{\pi f}{f_c}\right)}{\pi f \cos\left(\frac{\pi f}{2f_s}\right)} \right)^2, & \frac{u}{v} \text{ 为偶数} \\ 4f_c \left(\frac{\sin^2\left(\frac{\pi f}{4f_s}\right) \cos\left(\frac{\pi f}{f_c}\right)}{\pi f \cos\left(\frac{\pi f}{2f_s}\right)} \right)^2, & \frac{u}{v} \text{ 为奇数} \end{cases} \quad (6)$$

1.2 模拟畸变和数字-模拟畸变

模拟畸变下的 BOC 信号可表示为:

$$r(t) = s(t) * h(t) \quad (7)$$

其中, $s(t)$ 为理想 BOC 信号, $h(t)$ 为模拟畸变滤波器时域表达式。

BOC 模拟畸变信号与 BOC 理想信号的互功率谱函数:

$$P_{rs}(f) = P_s(f) H(f) \quad (8)$$

式中, $H(f)$ 为模拟畸变滤波器的频域响应函数, 解析表达式为:

$$H(f) = \frac{\sigma^2 + 4\pi^2 f_d^2}{(\sigma + j2\pi f)^2 + 4\pi^2 f_d^2} \quad (9)$$

其中, σ 为二阶阻尼振荡的衰减频率, 单位为 Mnepers/s, f_d 为二阶阻尼振荡的振荡频率, 单位为 MHz。

数字-模拟畸变下的 BOC 信号可表示为:

$$r(t) = [s(t) + d(t - \tau_d)] * h(t) \quad (10)$$

BOC 信号的数字-模拟畸变表现为数字畸变和模拟畸变两种效应的叠加, 根据数字畸变与模拟畸变的结论, 可以方便地给出 BOC 数字-模拟畸变信号与 BOC 理想信号的互功率谱:

$$P_{rs}(f) = [P_s(f) + e^{-j2\pi\tau_d} P_{sd}(f)] H(f) \quad (11)$$

2 BOC 信号畸变误差评估指标

2.1 数字畸变评估指标

从接收信号的表达式可以看出, 数字畸变信号可以建模为正常信号加上一路畸变信号, 这路畸变信号类似于附加于正常信号上的多径信号, 不

同之处在于畸变模型中的畸变信号与正常信号的时延和载波相位关系是一致的。为了评估数字畸变引入的畸变误差,采用类似多径误差的评估指标——畸变误差曲线,作为畸变误差的评估指标,用于评估数字畸变引起的BOC信号的畸变误差。

定义畸变误差与数字畸变延迟 Δ 之间的关系曲线为畸变误差曲线,用该曲线来评估数字畸变误差。借鉴文献[12]中多径误差包络的推导,可以推导出畸变误差的表达式如下:

$$\tau_e = \frac{\int_{-\beta_r/2}^{\beta_r/2} P_{sd}(f) \sin(2\pi f\tau_d) \sin(\pi fd) df}{2\pi \left\{ \int_{-\beta_r/2}^{\beta_r/2} f P_s(f) \sin(\pi fd) df + \int_{-\beta_r/2}^{\beta_r/2} f P_{sd}(f) \cos[2\pi f\tau_d] \sin(\pi fd) df \right\}} \quad (12)$$

其中, $P_s(f)$ 为理想BOC信号的功率谱密度, $P_{sd}(f)$ 为理想BOC信号与畸变量 $d(t)$ 的互功率谱密度, d 为相关器间隔。

2.2 模拟畸变评估指标

信号的模拟畸变误差可以建模为正常信号通过一个模拟畸变滤波器,通过模拟畸变滤波器后的滤波器将会发生形变,类似于正常信号通过了一个固定频率特性的带限滤波器。与理想信号的接收相比,模拟畸变会影响接收信号的相关输出信噪比、码跟踪精度,同时也可能会造成测距偏差。采用畸变相关损耗、畸变均方根带宽以及畸变偏差对模拟畸变引入的畸变误差进行评估。

借鉴文献[12],参考正常条件下信号评估的相关损耗、均方根带宽等指标,可以得到模拟畸变误差评估的相应指标分别如下:

1) 畸变相关损耗。相关损耗反映的是相关峰峰值相对于理想情况的降低,所定义的畸变相关损耗的归一化时域表达式如下:

$$\eta(\tau) \Big|_{\tau=0} = \frac{\left| \int_0^{T_p} s(t)r(t+\tau) dt \right|}{\sqrt{\int_0^{T_p} [s(t)]^2 dt \int_0^{T_p} [r(t)]^2 dt}} \quad (13)$$

其中, $s(t)$ 为理想信号, $r(t)$ 为畸变信号, T_p 为相关周期。

相应的归一化频域表达式如下:

$$\eta = \frac{\left| \int_{-\beta_r/2}^{\beta_r/2} f_c R(f) S^*(f) df \right|}{\sqrt{\int_{-\beta_r/2}^{\beta_r/2} P_s(f) df \int_{-\beta_r/2}^{\beta_r/2} P_r(f) df}} \quad (14)$$

其中: f_c 为伪随机序列的频率; $R(f)$ 表示畸变信

号的傅里叶变换; $S^*(f)$ 表示理想信号的傅里叶变换, $s(f)$ 的复共轭; $P_s(f)$ 为理想信号的功率谱密度; $P_r(f)$ 为畸变信号的功率谱密度; β_r 为接收机前端带宽。

接收机的捕获及电文解调过程都是基于对本地理想信号与接收信号相关输出值的门限判决来实现的,因此畸变相关损耗可以直接反映信号畸变导致信号捕获与电文解调性能下降的程度。所定义的畸变相关损耗作为评估模拟畸变误差的指标之一用于间接评估模拟畸变引起的捕获及数据解调的性能恶化程度。

2) 畸变RMS带宽。在信号正常匹配接收情况下,热噪声下信号 $s(t)$ 的码跟踪能力普遍采用RMS带宽:

$$\beta_{\text{RMS}} = \left[\int_{-\beta_r/2}^{+\beta_r/2} f^2 P_s(f) df \right]^{1/2} \quad (15)$$

信号的RMS带宽越大,其潜在的跟踪精度就越高。类似地,定义畸变条件下的等效RMS带宽:

$$\tilde{\beta}_{\text{RMS}} = \frac{\int_{-\beta_r/2}^{+\beta_r/2} f^2 P_{rs}(f) df}{\sqrt{\int_{-\beta_r/2}^{+\beta_r/2} f^2 P_s(f) df}} \quad (16)$$

其中, $P_{rs}(f)$ 为畸变信号与理想信号的互功率谱密度。式(16)给出的等效RMS带宽即为畸变RMS带宽。容易验证,当 $s(t) = r(t)$, $\tilde{\beta}_{\text{RMS}}$ 退化为 β_{RMS} 。

采用畸变RMS带宽评估模拟畸变后导航信号的测距能力。

3) 畸变偏差。模拟畸变偏差表示由于模拟畸变引起的鉴别器函数的过零点偏差,表征为测距偏差,可以表示为:

$$\tau_e = - \frac{\int_{-\beta_r/2}^{\beta_r/2} P_s(f) |H(f)| \sin(\theta) \sin(\pi fd) df}{2\pi \left[\int_{-\beta_r/2}^{\beta_r/2} f P_s(f) |H(f)| \cos(\theta) \sin(\pi fd) df \right]} \quad (17)$$

式中, $|H(f)|$ 为模拟畸变滤波器幅度, θ 为模拟畸变滤波器的相位角,其解析表达式为:

$$\begin{cases} |H(f)| = \frac{\sigma^2 + 4\pi^2 f_d^2}{\sqrt{(\sigma^2 + 4\pi^2 f_d^2 - 4\pi^2 f^2)^2 + 16\sigma^2 \pi^2 f^2}} \\ \theta = -\arctan\left(\frac{4\sigma\pi f}{\sigma^2 + 4\pi^2 f_d^2 - 4\pi^2 f^2}\right) \end{cases} \quad (18)$$

2.3 数字-模拟畸变评估指标

数字-模拟畸变表现为数字畸变和模拟畸变两种效应的叠加,按照上述的评估理论,可以得

到数字 - 模拟畸变误差评估的相应指标分别如下:

1) 畸变相关损耗。根据模拟畸变给出的定义,数字 - 模拟畸变的畸变相关损耗的归一化时域表达式如下:

$$\eta(\tau) |_{\tau \rightarrow 0} = \frac{\left| \int_0^{T_p} s(t) [s(t + \tau) * h(t + \tau)] dt \right|}{\sqrt{\int_0^{T_p} [s(t)]^2 dt \int_0^{T_p} [s(t) * h(t)]^2 dt}} \quad (19)$$

相应的归一化频域表达式如下:

$$\eta = \frac{\left| \int_{-\beta/2}^{+\beta/2} P_s(f) H(f) df \right|}{\sqrt{\int_{-\beta/2}^{+\beta/2} P_s(f) df \int_{-\beta/2}^{+\beta/2} P_s(f) |H(f)|^2 df}} \quad (20)$$

2) 畸变 RMS 带宽。根据模拟畸变给出的定义,数字 - 模拟畸变的畸变 RMS 带宽为:

$$\tilde{\beta}_{RMS} = \frac{\int_{-\beta/2}^{+\beta/2} f^2 P_s(f) H(f) df}{\sqrt{\int_{-\beta/2}^{+\beta/2} f^2 P_s(f) df}} \quad (21)$$

3) 畸变偏差。畸变误差曲线与模拟畸变评估相同,可以表示为:

$$\tau_e = \frac{\left\{ \int_{-\beta/2}^{+\beta/2} P_s(f) |H(f)| \sin(\theta) \sin(\pi f d) df + \int_{-\beta/2}^{+\beta/2} P_{sd}(f) |H(f)| \sin[2\pi f \tau_d + \theta] \sin(\pi f d) df \right\}}{2\pi \left\{ \int_{-\beta/2}^{+\beta/2} f P_s(f) |H(f)| \cos(\theta) \sin(\pi f d) df + \int_{-\beta/2}^{+\beta/2} f P_{sd}(f) |H(f)| \cos[2\pi f \tau_d + \theta] \sin(\pi f d) df \right\}} \quad (22)$$

3 北斗现代卫星导航信号畸变误差分析

我国最新对外公开的北斗全球导航系统信号体制参数中,B1 频段作为主要的民用及军用信号的播发频段,将在全球系统阶段播发 MBOC(6,1,1/11) 及 BOC(14,2) 信号^[12]。其中,MBOC(6,1,1/11) 信号为民用信号,BOC(14,2) 信号为军用信号。采用所提出的评估指标对北斗全球系统 B1 频点提供的这两种信号的畸变误差进行评估。

由于数字 - 模拟畸变可以分解为数字畸变与模拟畸变,这里将不再单独讨论数字 - 模拟畸变误差,而是分别探讨模拟畸变与数字畸变误差。本文仿真中取前端接收带宽为 60 MHz,相关器间隔趋于 0。

3.1 数字畸变误差分析

根据式(11)计算不同畸变误差下的 MBOC(6,1,1/11) 信号及 BOC(14,2) 信号的数字畸变误差如图 1、图 2 所示。

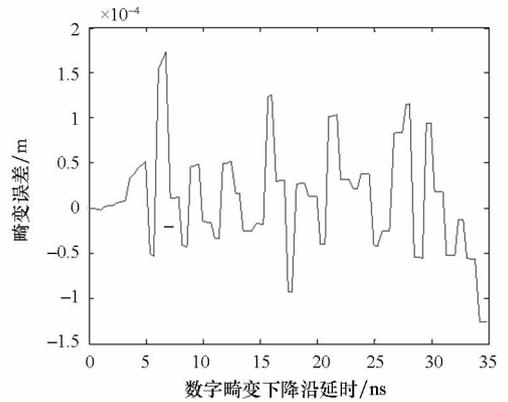


图 1 数字畸变下 BOC(14,2) 信号的畸变误差曲线
Fig.1 Digital distortion errors of BOC(14,2) under TMA

对于 BOC(14,2) 信号,数字畸变下的畸变误差较小,在 0.000 2 m 以内,因此数字畸变对于 BOC(14,2) 信号接收性能基本没有影响。对于 MBOC(6,1,1/11) 信号,畸变误差随畸变延迟的增大呈现正弦包络的变化趋势,且畸变误差在 0.05 m 以内,因此数字畸变对于 MBOC(6,1,1/11) 信号接收性能的影响在亚纳秒级。

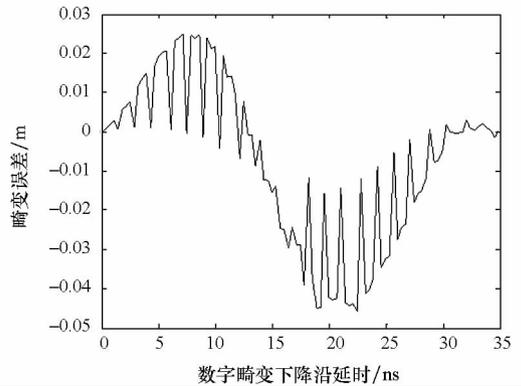


图 2 数字畸变下 BOC(6,1,1/11) 信号的畸变误差曲线
Fig.2 Digital distortion errors of MBOC(6,1,1/11) under TMA

3.2 模拟畸变误差分析

取模拟畸变的畸变参数为 $28 \text{ Mnepers/s} \leq \sigma \leq 60 \text{ Mnepers/s}$ 及 $2 \text{ MHz} \leq f_d \leq 30 \text{ MHz}$,根据给出评估指标分析 MBOC(6,1,1/11) 信号及 BOC(14,2) 信号的模拟畸变误差。

3.2.1 畸变相关损耗

根据式(13)计算给定模拟畸变误差下的 MBOC(6,1,1/11) 信号及 BOC(14,2) 信号的畸变相关损耗如图 3、图 4 所示。

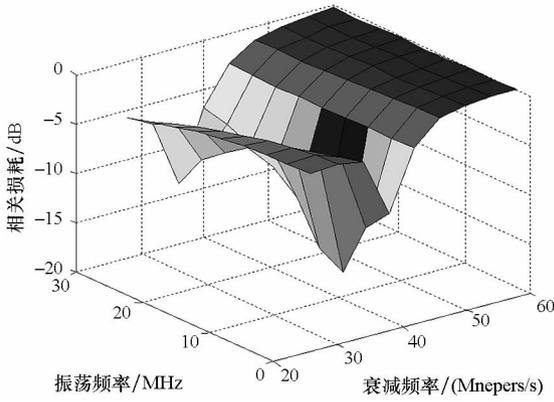


图3 模拟畸变下 BOC(14,2)信号的畸变相关损耗
Fig.3 Correlation loss of BOC(14,2) under TMB

对于 BOC(14,2)信号,不同畸变参数下的畸变相关损耗不同。对于某一衰减频率下的模拟畸变,振荡频率越大,畸变相关损耗增大。对于某一振荡频率下的模拟畸变,当衰减频率范围为 28 ~ 40 Mnepers/s时,畸变相关损耗随衰减频率的增大而增大;当衰减频率大于 40 Mnepers/s 时,畸变相关损耗随衰减频率的增大而减小;当衰减频率取值 40 Mnepers/s 左右时,畸变相关损耗在 10 dB 以下。

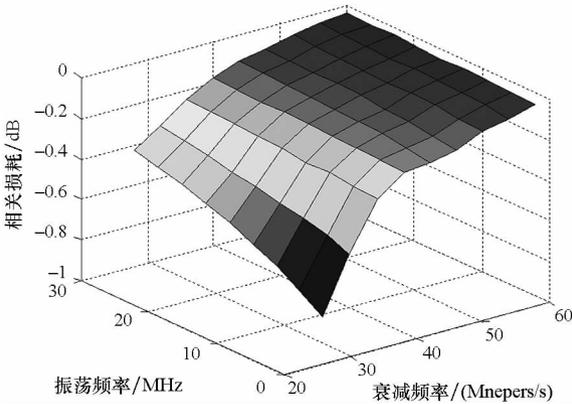


图4 模拟畸变下 MBOC(6,1,1/11)信号的畸变相关损耗
Fig.4 Correlation loss of MBOC(6,1,1/11) under TMB

对于 MBOC(6,1,1/11)信号,畸变相关损耗随着衰减频率和振荡频率的增大而减小,且损耗较小,在给定的畸变参数范围内,畸变相关损耗在 1 dB 以内。

3.2.2 畸变 RMS 带宽

根据式(15)计算 MBOC(6,1,1/11)信号及 BOC(14,2)信号的模拟畸变 RMS 带宽如图 5、图 6 所示。

对于 BOC(14,2)信号,不同畸变参数下的畸变 RMS 带宽不同。对于某一振荡频率下的模拟畸变,当衰减频率为 28 ~ 40 Mnepers/s 范围时,畸

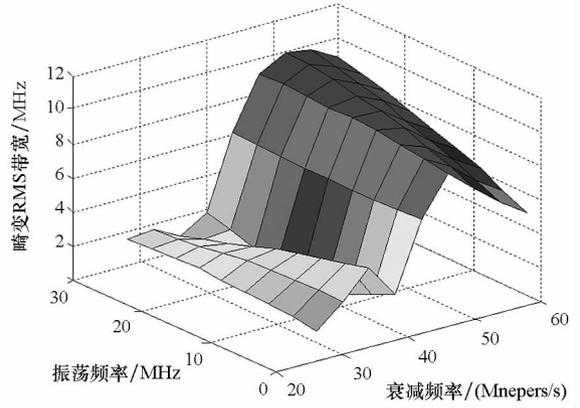


图5 BOC(14,2)的模拟畸变 RMS 带宽
Fig.5 RMS bandwidth of BOC(14,2) under TMB

变 RMS 带宽在 4 MHz 内。非畸变条件下的 RMS 带宽为 14 MHz,畸变条件下的 RMS 带宽最低降为 0.2 MHz 左右。在衰减频率为 48 Mnepers/s 以上时,畸变 RMS 带宽随着振荡频率增大而增大。

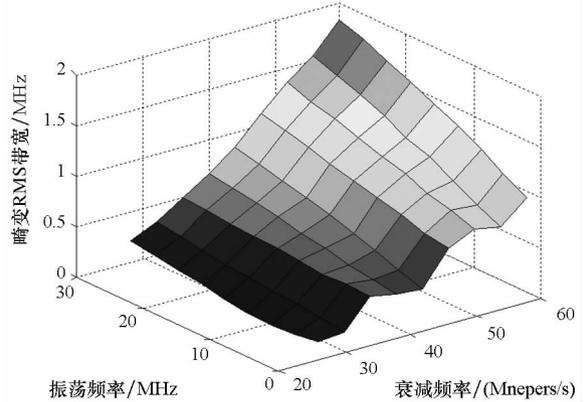


图6 MBOC(6,1,1/11)的模拟畸变 RMS 带宽
Fig.6 RMS bandwidth of MBOC(6,1,1/11) under TMB

对于 MBOC(6,1,1/11)信号,畸变 RMS 带宽基本随着衰减频率和振荡频率的增大而增大。当衰减频率 28 ~ 36 Mnepers/s 范围时,畸变 RMS 带宽在 1 MHz 内,非畸变条件下的 RMS 带宽为 3.78 MHz,畸变条件下的 RMS 带宽最低降为 0.015 MHz 左右。

3.2.3 畸变偏差

根据式(16)计算不同畸变误差下的 MBOC(6,1,1/11)信号及 BOC(14,2)信号的模拟畸变误差如图 7、图 8 所示。

对于 BOC(14,2)信号,当衰减频率取值为 40 Mnepers/s左右、振荡频率取值为 12.5 MHz 左右时,畸变偏差较大,达到了 189 m。其他畸变参数下的畸变偏差较小,基本在 30 m 内。对于 MBOC(6,1,1/11)信号,当衰减频率取值为 28 Mnepers/s左右、振荡频率取值为 2 ~ 9 MHz 范围内时,畸变偏差较大,最大达到了近 570 m。其

他畸变参数下的畸变偏差较小,基本在 20 m 内。

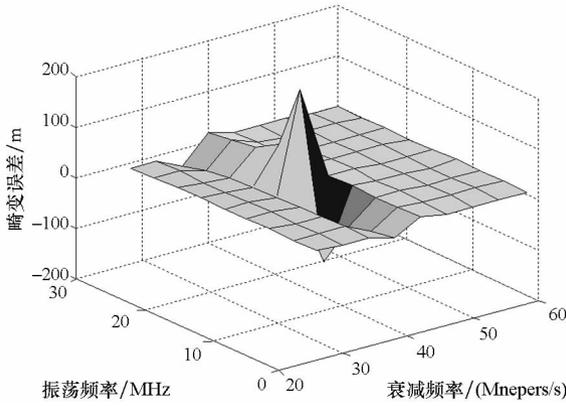


图 7 模拟畸变下 BOC(14,2)信号的畸变误差曲线

Fig. 7 Analog abnormal errors of BOC(14,2) under TMB

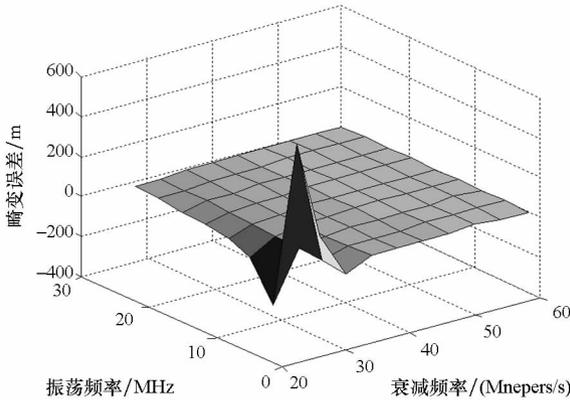


图 8 模拟畸变下 MBOC(6,1,1/11)信号的畸变误差曲线

Fig. 8 Analog abnormal errors of MBOC(6,1,1/11) under TMB

4 结论

针对现代全球导航系统广泛采用的 BOC 信号,构建了用于解析评估 BOC 信号畸变误差的评估指标。并采用构建的解析评估指标对北斗全球系统 B1 频段上的 BOC(14,2)及 MBOC(6,1,1/11)信号的畸变误差进行评估。两种信号的数字畸变误差均较小,分别在 0.000 2 m 及 0.05 m 内;BOC(14,2)信号在模拟畸变条件下的畸变相关损耗、畸变 RMS 带宽及畸变偏差在衰减频率取 40 Mnepers/s 时会出现较大的畸变误差,MBOC(6,1,1/11)信号的模拟畸变误差相比较平坦,随畸变参数的增大而减小。构建的畸变误差评估指标为

北斗全球导航系统的信号体制设计提供重要借鉴。

参考文献 (References)

- [1] Edgar C, Czopek F, Barker L B. A cooperative anomaly resolution on PRN - 19 [C]// Proceedings of the 12th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, 1999: 2269 - 2271.
- [2] Phelts R E. Multicorrelator techniques for robust mitigation of threats to GPS signal quality [D]. USA:Stanford University, 2001.
- [3] Phelts R E, Akos D M, Enge P K. Robust signal quality monitoring and detection of evil waveforms [C] // Proceedings of the 13th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, 2000: 1180 - 1190.
- [4] Van Dierendonck A J, Akos D M, Pullen S P, et al. Practical implementation considerations in the detection of GPS satellite signal failure [C]// Proceedings of the IAIN World Congress and the 56th Annual Meeting of the Institute of Navigation, 2000: 250 - 259.
- [5] Mitelman A M, Akos D M, Pullen S P, et al. Estimation of ICAO threat model parameters for operational GPS satellites [C]//Proceedings of the 15th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, 2002: 12 - 19.
- [6] Betz J W. Binary offset carrier modulations for radionavigation[J]. Navigation, Journal of the Institute of Navigation, 2002, 48(4): 227 - 246.
- [7] Interface specification IS-GPS -200 Revision E [R]. Global Positioning Systems Wing, 2010.
- [8] Galileo open service signal in space interface control document (OS SIS ICD) [R]. European Space Agency, 2006.
- [9] Phelts R E, Dennis M A. Effects of signal deformations on modernized GNSS signals[J]. Journal of Global Positioning Systems, 2006, 5(2): 2 - 10.
- [10] Fontanella D, Paonni M, Eissfeller B. A novel evil waveforms threat model for new generation GNSS signals; theoretical analysis and performance [C]//Proceedings of the 5th ESA Workshop on Satellite Navigation Technologies and European Workshop on GNSS Signals and Signal Processing (NAVITEC), IEEE, 2010: 1 - 8.
- [11] 刘文祥. 卫星导航系统高精度处理与完好性监测技术研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2011. LIU Wenxiang. Study on techniques of accuracy augmenting and integrity monitoring for satellite based navigation system [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011. (in Chinese)
- [12] 唐祖平. GNSS 信号设计与评估若干理论研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2009. TANG Zuping. Research on relevant theory of GNSS signal design and evaluation [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2009. (in Chinese)