

余弦 BOC 信号伪相关函数无模糊跟踪方法

周艳玲, 张羽, 潘永才, 曾张帆

(湖北大学 计算机与信息工程学院, 武汉 430062)

摘要: 二进制偏移载波 (binary offset carrier, BOC) 调制方式实现了频谱分离和频段共享, 被应用于全球导航卫星系统中; 但由于 BOC 信号自相关函数的主峰和副峰幅度差异较小, 容易引起捕获和跟踪模糊, 导致较大的测距误差; 余弦相位 BOC (Cosine-phased BOC, CosBOC) 信号自相关函数形式相对复杂, 给其无模糊处理带来了挑战; 基于伪相关函数法 (pseudo correlation function, PCF) 思想, 针对 CosBOC 信号设计本地参考信号的特殊码片波形, 与接收信号相关后经过非线性组合可获得单峰无模糊相关函数, 消除了跟踪模糊性; 仿真结果表明: 参数取值合适时该方法的跟踪和抗多径性能均优于同等条件下的 BPSK-like 方法。

关键词: 全球导航卫星系统; 余弦相位二进制偏移载波调制; 伪相关函数法; 无模糊跟踪; 抗多径干扰

Unambiguous Tracking Method for Cosine-phased BOC Signals Based on Pseudo Correlation Function Method

Zhou Yanling, Zhang Yu, Pan Yongcai, Zeng Zhangfan

(School of Computer and Information Engineering, Hubei University, Wuhan 430062, China)

Abstract: Binary offset carrier (BOC) signals commonly used in global navigation satellite system because it can guarantee the coexistence and interoperability with different systems, while it usually causes ambiguity problems and range measurement errors due to the similar magnitude multiple side peaks of the autocorrelation function. The autocorrelation function of the Cosine-phased binary offset carrier (CosBOC) is relatively complicated and brings challenge in the unambiguous tracking. Based on the concept of pseudo correlation function (PCF), this paper proposes specially designed chip spreading symbols of the local reference signals for CosBOC signals. After correlating with the received signal and nonlinear processing, a no side-peak function can be obtained and the ambiguity is eliminated. Results demonstrate that the code tracking and multipath mitigation performances of the proposed method are better than the BPSK-like method on the whole.

Keywords: global navigation satellite system; cosine-phased binary offset carrier (CosBOC); pseudo correlation function (PCF); unambiguous tracking; multipath mitigation

0 引言

二进制偏移载波 (binary offset carrier, BOC) 信号实现了频谱分离和频段共享, 很好地解决了随着全球导航卫星系统 (global navigation satellite system, GNSS) 的飞速发展带来的导航信号频谱拥挤问题; 同时 BOC 信号具有实现更高的测距精度和更好的抗多径性能潜力。BOC 信号是由有 -1 和 1 两值的伪随机码 (pseudo random noise, PRN) 和方波子载波相乘得到, 通常记作 BOC (m, n), 其中 m 代表子载波频率 f_c 为 $m \times 1.023$ MHz, n 代表 PRN 扩频码速率 f_c 为 $n \times 1.023$ MHz^[1]。BOC 信号已广泛使用在各类卫星导航系统中。GPS 系统中的 M 码采用了正弦相位子载波调制的 BOC 信号, 记为 (Sine-phased BOC, SinBOC) 信号, Galileo 系统中公众受限服务信号采用余弦相位子载波调制的 BOC 信号, 记为 (Cosine-phased BOC, CosBOC) 信号。北斗卫星导航系统计划在 B1、B3 频段分别发射 BOC (14, 2) 和 BOC (15, 2.5) 调

制的授权信号。BOC 信号的自相关函数呈现多峰性质, 接收机在信号捕获和跟踪时可能出现模糊问题, 跟踪环路误锁在某个副峰上, 从而导致较大的测距误差。CosBOC 信号的自相关函数相对 SinBOC 信号更为复杂, 也为其无模糊处理带来一定的挑战。

目前解决 BOC 信号跟踪模糊的问题主要有以下几种方法: (1) 类 BPSK (BPSK-like)^[2] 是一种经典方法, 首先对本地信号进行 BPSK 调制, 使其频谱搬移到 BOC 信号两个边带附近, 然后再和接收的 BOC 信号进行相关运算, 可得到单峰的互相关函数, 该方法获得的相关函数变宽, 且 BPSK 信号和 BOC 信号的不匹配, 造成能量损耗和跟踪精度下降。(2) S 曲线技术^[3-4] 可以合成一个消除误锁点的非对称的 S 曲线, 该方法拥有良好的抗多径能力, 对热噪声比较敏感。(3) 伪相关函数法^[5] 是对接收信号和经过特殊波形设计的本地信号进行相关运算, 再经过非线性组合获得无模糊的相关函数。文献 [6] 提出了一种基于 PCF 方法的理论框架并给出了本地信号波形的一种设计方向。所有基于伪相关函数处理跟踪模糊的方法, 其主要的不同在于本地信号波形的设计与非线性的组合方式。在文献 [5-8] 中提出的 PCF 解决方案均仅针对于 SinBOC 信号, 并不适用于 CosBOC 信号。(4) 按照 PCF 方法思想, 文献 [9] 构造出一种拥有更陡峭主峰的合成函数来解决 CosBOC 信号的模糊问题, 由于鉴别器输出仍带有两个负峰, 因此这种方法并不适用于 CosBOC 信号的非模糊跟踪。(5) 文献 [10] 采用了边峰消除技术, 跟踪精度有所提高, 同时适用于 Sin-

收稿日期: 2016-09-12; 修回日期: 2016-11-02。

基金项目: 国家自然科学基金 (61301144; 61601175)。

作者简介: 周艳玲 (1981-), 女, 湖北广水人, 副教授, 博士, 主要从事卫星导航接收技术和信号设计方向的研究。

潘永才 (1964-), 男, 教授, 主要从事卫星导航及信号处理方向的研究。

通讯作者: 曾张帆 (1982-), 男, 副教授, 主要从事 5G 通信方向研究。

BOC 信号和 CosBOC 信号, 但运算量较大。

本文针对 CosBOC 信号提出了一种基于 PCF 的无模糊跟踪方法, 能有效消除相关函数的副峰, 获得无模糊的相关函数, 在参数取值合适的情况下, 性能也能最优化。本文分为 3 个部分: 第一部分结合 CosBOC 信号模型设计了 PCF 本地信号参考波形; 第二部分仿真分析了该方法的跟踪和抗多径性能; 最后给出本文结论。

1 PCF 方法原理

CosBOC 基带信号的表达式为 $s(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} (-1)^{C_i} p(t - iT_c)$, 其中 C_i 是取值为 $\{0, 1\}$ 的扩频码序列, $p(t)$ 代表伪码持续时间对应的码片波形, 在一个伪码周期 T_c 内分为 M 个片段, $M = 4m/n$, 每段长度相同。码片波形表示为 $p(t) = \sum_{k=0}^{M-1} \varphi_k(t) d_k$, 其中:

$$\varphi_k(t) = \begin{cases} 1 & t \in \left[\frac{kT_c}{M}, \frac{(k+1)T_c}{M} \right] \\ 0 & \text{others} \end{cases} \quad (k = 0, 1, \dots, M-1) \quad (1)$$

d_k 是向量 \vec{d} 中第 k 个元素, 取任意实数值。码片波形能量归一化, 向量 \vec{d} 满足 $\sum_{k=0}^{M-1} d_k^2 = M$ 。这样码片波形由向量 $\vec{d} = [d_0, d_1, d_2, \dots, d_{M-1}]^T_{M \times 1}$ 唯一确定。CosBOC 信号的码片波形可以表示为 $\vec{d} = [1, -1, -1, 1, \dots, 1, -1, -1, 1]^T_{M \times 1}$ 。

假设扩频码序列是随机序列, 前端信号带宽无限大, 接收信号和两路本地信号的相关函数可近似表示两者的调制波形的互相关函数。即为:

$$R_i(\tau) = \int_0^{T_c} p(t) L_i(t - \tau) dt \quad i = 1, 2 \quad (2)$$

其中: τ 为延迟时间, $L_i(t)$ 是本地参考信号的码片波形, $R_i(\tau)$ 是接收信号与相应的本地参考信号的互相关函数。无模糊的 PCF 输出通过 R_1 和 R_2 的非线性组合得到。本文采用非线性形式如下:

$$R(\tau) = |R_1(\tau)| + |R_2(\tau)| - |R_1(\tau) + R_2(\tau)| \quad (3)$$

因为码片波形由向量 \vec{d} 决定, 即可以通过调整向量中的元素值可以改变码片波形的形状。PCF 方法的关键在于设计拥有特殊码片波形的两路信号。将 CosBOC 信号的特性以及 PCF 设计框架考虑在内, 两路本地信号一定关于中心对称, 两路信号的码片波形用向量可以表示为:

$$\vec{d}_1(\alpha) = \left[\sqrt{\frac{M}{1+\alpha^2}}, \alpha \sqrt{\frac{M}{1+\alpha^2}}, 0, \dots, 0 \right]^T_{M \times 1} \quad (4)$$

$$\vec{d}_2(\alpha) = \left[0, \dots, 0, -\alpha \sqrt{\frac{M}{1+\alpha^2}}, -\sqrt{\frac{M}{1+\alpha^2}} \right]^T_{M \times 1} \quad (5)$$

其中: α 是比例因子, 控制调制符号的形状, $\alpha \in [0, 1)$ 。由本地信号的对称性容易得到 $R_1(\tau) = -R_2(-\tau)$ 。按照上述条件设计的本地参考信号波形如图 1 所示。

联合式 (2) (3) (4) (5), 得到 PCF 输出的表达式为:

$$R(\tau; \alpha) = \begin{cases} \frac{4M|\tau| + 2(1-\alpha)T_c}{\sqrt{M(1+\alpha^2)}T_c} & \tau < \left| \frac{(1-\alpha)T_c}{2M} \right| \\ 0 & \text{others} \end{cases} \quad (6)$$

从式 (6) 很容易看出, 经过上述步骤处理后 CosBOC 信号的伪相关函数输出仅有一个主峰, 消除了跟踪模糊。

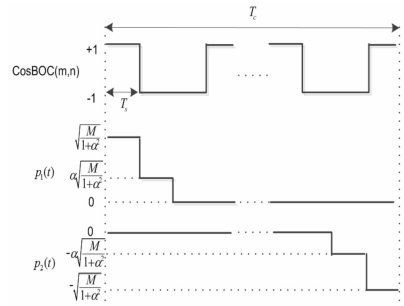


图 1 本地参考信号波形

以 CosBOC (10, 5) 为例, 图 2 给出了当 α 分别取 0 和 0.2 时的接收信号和本地信号的互相关函数的波形和伪相关函数输出。可以看出, PCF 输出波形只有一个主峰, 没有出现副峰; 该主峰呈窄三角状, 随着 α 取值的增大, PCF 主峰的峰值将会变得更小, 宽度也随之更窄。无论 α 取任意有效值, PCF 输出都没有其他过零点。这就表明, PCF 方法有效消除了所有误锁点, 解决了模糊性问题。

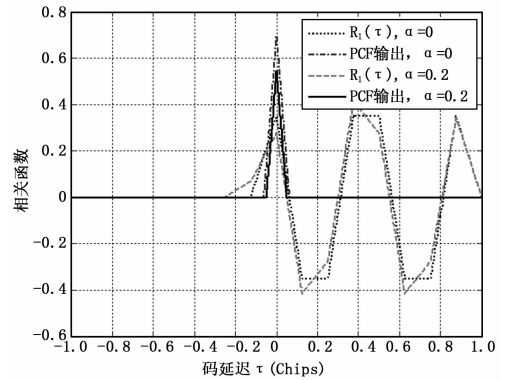


图 2 基于 PCF 方法的 CosBOC (10, 5) 的输出

基于 PCF 的码跟踪环路的结构图如图 3 所示, T_p 为积分时间, N 为一个 T_p 内积分周期数。本地信号调制器和相关器可由门控积分器代替。接收信号进入接收机后首先进行载波剥离, 再与接收机中复现的超前、滞后伪码相关运算, Δ 为相关器间隔, 得到的结果经过 PCF 生成器处理得到单峰相关函数, 最后到达非相干超前减滞后鉴别器作进一步处理。

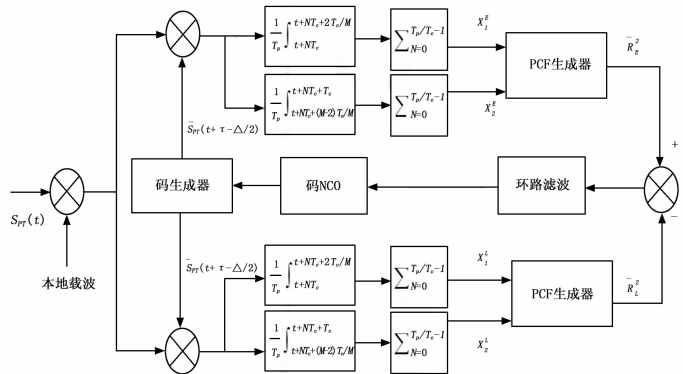


图 3 基于 PCF 方法的码跟踪环路结构图

2 性能分析

在卫星导航系统中, 码跟踪环的热噪声和多径误差是影响测距精度的主要因素。

2.1 跟踪性能

由于鉴别器是非相干的，可忽略残余载波影响。经过积分和清零后的每一路输出的表达式为：

$$X_i^j \approx A/2R_i(\epsilon + \delta_i\Delta/2) + n_i^j, i = 1, 2 \quad (7)$$

其中：A 是接收信号的幅值，i = 1, 2 分别代表两路本地参考信号，ε 是延迟估计误差，j = E, L 分别对应超前、滞后相关器，δ_E = 1, δ_L = -1。Δ 是相关器间隔，n_i^j 是单边功率谱密度为 2N₀ 的高斯白噪声和本地参考信号的互相关结果。

R_{ij} 定义为本地参考信号 L₁(t) 和 L₂(t) 的互相关函数，R_{ii} 是 L_i(t) 的自相关函数，四条支路 X₁^E, X₁^L, X₂^E, X₂^L 在 ε = 0 的情况下的联合分布满足：

$$(X_1^E, X_2^E, X_1^L, X_2^L)^T \sim N(\mu, \sigma^2) \quad (8)$$

其中：

$$\mu = \frac{A}{2} \left(R_1 \left(\frac{\Delta}{2} \right), R_2 \left(\frac{\Delta}{2} \right), R_1 \left(-\frac{\Delta}{2} \right), R_2 \left(-\frac{\Delta}{2} \right) \right)^T \quad (9)$$

$$\sigma^2 = \frac{N_0}{4T_p} \begin{bmatrix} R_{11}(0) & R_{12}(0) & R_{11}(\Delta) & R_{12}(\Delta) \\ R_{21}(0) & R_{22}(0) & R_{21}(\Delta) & R_{22}(\Delta) \\ R_{11}(-\Delta) & R_{12}(-\Delta) & R_{11}(0) & R_{12}(0) \\ R_{21}(-\Delta) & R_{22}(-\Delta) & R_{21}(0) & R_{22}(0) \end{bmatrix} \quad (10)$$

非相干超前减滞后鉴别器的输出为：

$$\epsilon = (|X_1^E| + |X_2^E| - |X_1^L + X_2^L|)^2 - (|X_1^L| + |X_2^L| - |X_1^E + X_2^E|)^2 \quad (11)$$

基于以上数学模型，对鉴别特性曲线过零点求导可以得到鉴别器增益 G，通过蒙特卡洛仿真可以得到四条支路的输出样本。由于信号会受前端滤波器的带宽的影响，本文选择了理想情况，无限大带宽即不考虑前端滤波器影响下，和典型前端带宽下两种情况进行了分析。当鉴别器间隔 Δ = 0.05chips 时，针对 CosBOC (10, 5) 信号，不同方法下的鉴别器增益如表 1 所示，容易发现，基于 PCF 方法的鉴别器增益要大于 BPSK-like 方法，并且随着 α 取值的增大，鉴别器增益逐渐减小。

表 1 鉴别器增益 G, 相关器间隔为 0.05chips

	Traditional	BPSK Like	PCF, α=0	PCF, α=0.2
无限带宽	6.9750	0.975	4.800	3.0769
40MHz	2.7976	0.6590	2.1503	1.4927

闭环码跟踪抖动标准差通过 $\sigma_c \approx \sqrt{2B_L T_p} (1 - 0.5B_L T_p) \sigma_c / G$ 得到，B_L 是单边带环路带宽，T_p 是积分时间。当 B_L = 2 Hz, T_p = 1 ms, Δ = 0.5chips 时，图 4 和图 5 给出了不同前端带宽下基于 PCF 方法，BPSK-like 方法和传统的 DLL 方法下的码跟踪抖动标准差随载噪比变换曲线。从仿真结果可以看出：(1) PCF 方法的码跟踪精度比传统的 DLL 方法要差，因为本地信号的零值部分导致相关后信号的能量损失过多，但这个比较是基于 DLL 方法没有误锁点的理想情况，实际情况下，DLL 方法存在多个误锁点，容易出现较大跟踪误差。随着信噪比 C/N₀ 逐渐增大，PCF 方法的码跟踪精度越来越接近 DLL 方法，并且 PCF 不存在任何模糊性问题。(2) PCF 方法的码跟踪抖动标准差随着 α 的增大而增大，主要由于 α 增大会导致鉴别器增益减小。(3) 当带宽无限大即不考虑前端滤波器影响时，PCF 的码跟踪精度比 BPSK-like 要好，因为相比于后者，前者的主峰更尖锐。(4) 前端滤波器带宽为 40 MHz，当 α = 0 时，PCF 的码跟踪精度优于 BPSK-like 方法；当 α = 0.2 且载噪比 C/N₀ > 30 dB-Hz 时，PCF 的码跟踪精度依旧优于

BPSK-like 方法。

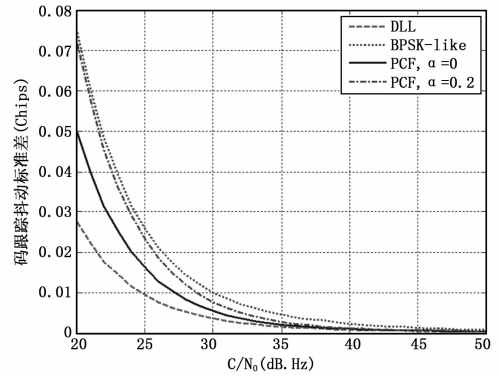


图 4 无限带宽下码跟踪抖动标准差随载噪比变化的曲线，Δ = 0.05chips, T_p = 1 ms, B_L = 2 Hz

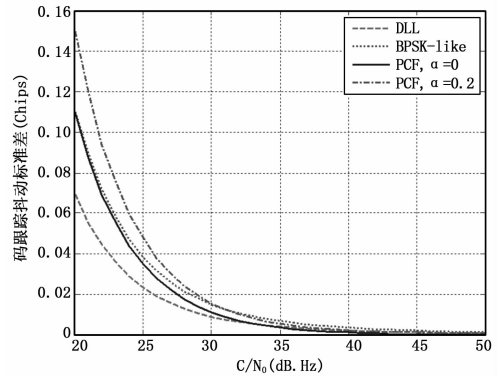


图 5 40 MHz 带宽下码跟踪抖动标准差随载噪比变化的曲线，Δ = 0.05chips, T_p = 1 ms, B_L = 2 Hz

2.2 抗多径性能

多径误差包络通常是衡量抗多径性能的指标。但由于 BOC 信号的多径误差包络呈现波浪起伏，尤其是经过 PCF 方法非线性处理后，多径误差包络呈现无规则曲线，因此很难给对抗多径性能给出全面的结论。运行平均多径误差 (running average multipath error, RAME) 由多径误差包络计算出，可以反映出总体的抗多径性能。其对同相分量和正交分量的多径误差包络取绝对值相加后对多径延迟进行积分，再对多径延迟求平均而得到^[11]，表达式为：

$$E_{RAME}(\tau) = \frac{1}{2\tau} \int_0^\tau (|E_{Inphase}(\tau)| + |E_{Outphase}(\tau)|) d\tau \quad (12)$$

其中：τ 是多径延迟时间，E_{Inphase}(τ) 和 E_{Outphase}(τ) 分别代表同相和正交多径误差包络。

同样地，由于信号会受前端滤波器的带宽的影响，抗多径干扰性能选择了无限大带宽即不考虑前端滤波器影响下，和典型前端带宽下两种情况进行了分析。传统 DLL 方法、BPSK-like 方法、PCF 方法的运行平均多径误差曲线在前端带宽无限大和 40 MHz 时分别如图 6 和图 7 所示。从图中可以看出：(1) 当前端带宽无限大即不考虑前端滤波器影响时，PCF 方法的运行平均多径误差大于传统 DLL 方法。在 α = 0 且多径延迟超过 0.24chips 或 α = 0.2 且多径延迟超过 0.5chips 时，PCF 的误差小于 BPSK-like 方法。(2) 考虑有限带宽情况，当前端滤波器带宽为 40 MHz 时，多径误差都增大。当 α = 0 多径延

迟区间在 (0.09, 0.72) chips 内, PCF 方法的平均延迟多径误差要小于传统 DLL 方法; 当 $\alpha = 0$ 且多径延迟超过 0.21chips 或 $\alpha = 0.2$ 且多径延迟大于 0.53chips, PCF 方法的平均多径延迟误差小于 BPSK-like 方法。可见, 在大部分区间 PCF 方法的抗多径干扰能力整体上优于 BPSK-like 方法。

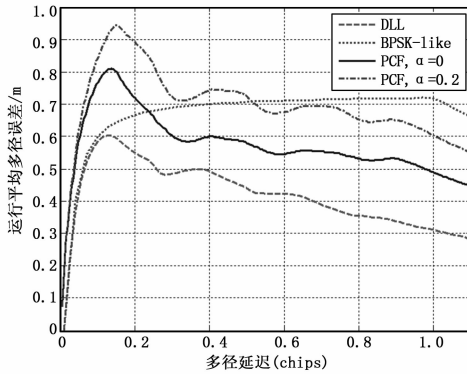


图 6 无限带宽下 CosBOC (10, 5) 运行平均多径误差, $\Delta=0.05\text{chips}$, 多径衰减 6 dB

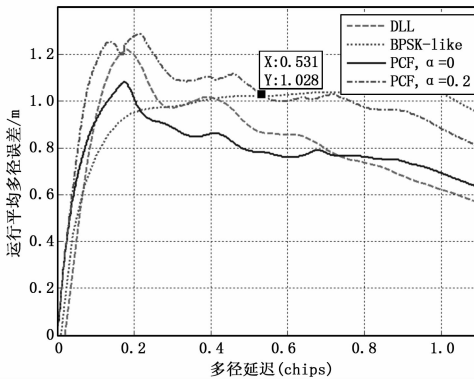


图 7 40 MHz 带宽下 CosBOC (10, 5) 运行平均多径误差, $\Delta=0.05\text{chips}$, 多径衰减 6 dB

3 结论

本文针对 CosBOC 信号跟踪模糊性提出了一种基于伪相关函数的解决方法, 并分析了该方法下信号的抗热噪声性能和抗 (上接第 142 页)

3 结论

- (1) 连杆锻造成形致密过程总体呈现不均匀性。整只连杆靠近中心部位密度较高, 杆身部分所受等效应力大, 成形密度高, 致密效果好; 连杆大头、小头部位所受应力应变小, 成形密度低, 致密化效果差。
- (2) 初始相对密度 ρ_0 大的预锻坯, 各处成形相对密度大, 致密效果好; 反之, 初始相对密度 ρ_0 小的预锻坯, 致密效果差。
- (3) 摩擦因子 μ 越大, 在相同变形量情况下预锻坯的相对密度分布越不均匀, 锻造终了时连杆大头、小头的相对密度值越小。

参考文献:

[1] 陈其玲. 粉末热锻零件性能影响因素研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2013.
 [2] 沈中元. 中国汽车领域的节能潜力 [J]. 国际石油经济, 2006

多径性能。结果表明, 当参数取值合理, PCF 方法的码跟踪精度和抗多径性能优于 BPSK-like 方法。

参考文献:

[1] Elena S L, Adina B, Markku R. Low-complexity unambiguous acquisition methods for BOC-modulated CDMA signals [J]. International Journal of Satellite Communications and Networking. 2008, 26 (6): 503-522.
 [2] Martin N, Leblond V, Guillotel G, et al. BOC (x, y) signal acquisition techniques and performances [A]. Proceedings of ION GPS/GNSS 2003 [C]. Portland, OR, September 2003.
 [3] Ren J W, Zhou S H, Jia W M, et al. Non-Coherent Unambiguous Tracking Method for Composite Binary Offset Carrier Modulated Signals Based on S-Curve Shaping Technique [J]. IEEE Communications Letters, 2013, 17 (8): 1540-1543.
 [4] Shen F, Xu G, Li Q. Non-Coherent Unambiguous Tracking Method for Cosine-BOC Signals Based on an S-Curve Shaping Technique [J]. IEEE Signal Processing Letters. 2015, 22 (6): 752-756.
 [5] Yao Z, Cui X, Lu M, et al. Pseudo-correlation function-based unambiguous tracking technique for sine-BOC signals [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2010, 46 (4): 1782-1796.
 [6] Yao Z, Lu M. Side-peaks cancellation analytic design framework with applications in BOC signals unambiguous processing [A]. Proceedings of ION ITM [C]. 2011.
 [7] Chae K, Lee S R, Liu H, et al. An unambiguous correlation function for generic sine-phased binary offset carrier signal tracking [J]. Computers and Electrical Engineering. 2015.
 [8] Yan T, Wei J L, Tang Z P, et al. Unambiguous Acquisition/Tracking Technique for High-Order Sine-Phased Binary Offset Carrier Modulated Signal [J]. Wireless Pers Commun, 2015, 1-23.
 [9] Shen F, Xu G, Xu D. Unambiguous Acquisition Technique for Cosine-Phased Binary Offset Carrier Signal [J]. IEEE Communications Letters, 2014, 18 (10): 1751-1754.
 [10] Lee Y, Chong D, Song I, et al. Cancellation of correlation side-peaks for unambiguous BOC signal tracking [J]. IEEE Communications Letters, 2012, 16 (5): 569-572.
 [11] Irsigler M, J. Avila-Rodriguez A, Hein G W, Criteria for GNSS Multipath Performance Assessment [A]. Proceedings of ION GNSS ITM [C]. 2005.
 [2] Edmond Ilia, George Lanni, 辛军等. 高强度粉末锻造连杆的研究 [J]. 内燃机学报, 2008, 26 (5): 463-469.
 [4] 蒋海勇. 发动机连杆材料及工艺 [J]. 内燃机与配件, 2013 (10): 23-26.
 [5] 李永志. 粉末锻造高致密化成形及数值模拟 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2004.
 [6] 曹顺华, 林信平, 李炯义. 粉末冶金温压工艺在汽车连杆制备中的应用 [J]. 汽车工艺与材料, 2004 (3): 1-5.
 [7] 张显. 连杆坯生产的几种工艺 [J]. 湖南农机, 2013 (5).
 [8] Kuhn H A, Downey C L. Deformation characteristics and plasticity theory of sintered powder materials [J]. International Journal of Powder Metallurgy. 1971, 7 (1): 15-20.
 [9] 胡建华, 林冲, 张文曠. Ni-Al 粉体材料的变形致密化研究 [J]. 塑性工程学报, 2008: 86-89.
 [10] 赵伟斌. 金属粉末温压成形的力学建模和数值模拟 [D]. 广州: 华南理工大学, 2005.