

DOI: 10.13382/j.jemi.B2306379

# 北斗新体制 BOC B1C 导航信号模拟与生成\*

马超 瞿智 李献斌 周超

(国防科技大学智能科学学院 长沙 410073)

**摘要:** 卫星导航信号模拟与测试作为全球卫星导航定位系统研制建设及导航接收机厂家测试验证的必要环节,其相关技术的进步集中反映了一个国家卫星导航系统建设和应用的水平。随着北斗新体制 BOC 信号的应用推广,给导航信号模拟与测试又提出了新的要求和挑战,基于伪距迭代和时延滤波技术,实现了对北斗新体制 BOC B1C 信号的基带生成,并利用开源软件接收机平台对自生成的基带信号进行了捕获、跟踪、解调、定位解算,定位结果显示,三维定位误差方差优于 0.74 m,二维定位误差方差优于 0.43 m,该模拟信号能够满足测试要求。

**关键词:** BOC B1C; 伪距迭代; 时延滤波; 开源软件接收机

**中图分类号:** TN961 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1020

## BeiDou BOC B1C navigation signal simulation and generation

Ma Chao Qu Zhi Li Xianbin Zhou Chao

(College of Intelligence Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** Satellite navigation signal simulation and testing are the necessary links in the development and construction of global navigation satellite system and navigation receiver manufacturers. The progress of related technologies reflects the level of a country's satellite navigation system construction and application. The application of BOC signals in the BeiDou new modulation has put forward new requirements and challenges. Aiming to generate the baseband signal of BOC B1C BeiDou new modulation based on the pseudo range iteration and time-delay filtering technology, the open-source software defined receiver is used to capture, track, demodulate and locate the self-generated baseband signal. The positioning results show that the 3D positioning error variance is better than 0.74 m and the 2D positioning error variance is better than 0.43 m, which meet the simulation and test requirements.

**Keywords:** BOC B1C; pseudo range iteration; time-delay filtering; open-source software defined receiver

## 0 引言

2020年7月31日北斗三号全球卫星导航系统(BeiDou 3 global navigation satellite system, BD3 GNSS)正式开通,标志着我国自1994年北斗一号建设启动以来,历经近30年实践探索,实现了从双星定位、到区域服务、再到全球覆盖的“三步走”建设目标。在北斗卫星导航系统“光彩夺目”的背后,离不开卫星导航模拟仿真与测试“默默无闻”做的工作。卫星导航模拟仿真与测试是指在受控实验室环境下,通过对真实卫星导航系统的高

精度模拟进而对全球卫星导航定位系统接收机及其系统的研制、生产、应用、测试检验、模拟训练等环节提供关键性的测试与验证支持。导航信号模拟源作为卫星导航系统及各类导航接收机设备的关键仪器,一直以来受到欧美国家技术封锁和产品禁运。经过多年的发展,先后突破导航信号精密时延控制<sup>[1]</sup>、高动态卫星导航信号模拟<sup>[2-5]</sup>等关键技术,其中以国防科技大学、中国电子科技集团第五十四研究所为代表生产的导航信号模拟器已赶超世界先进水平。近年来,随着卫星导航在国民经济等各个领域的广泛应用,卫星导航模拟与仿真技术也得到前所未有的发展,以车载、手持终端等为代表的出厂测

收稿日期: 2023-03-28 Received Date: 2023-03-28

\* 基金项目: 国家自然科学基金(62001491)、第九届中国科协青年人才托举工程(2023QNRC001)项目资助

试<sup>[6-7]</sup>,和以导航干扰与抗干扰、欺骗与防欺骗的进阶测试,均离不开卫星导航信号模拟技术的进步<sup>[8-13]</sup>。

考虑北斗卫星导航与 GPS(global positioning system)等系统的兼容互操作性,以 BOC(binary offset carrier)调制方式为代表的新一代卫星导航信号设计正逐步映入人们眼帘<sup>[14-18]</sup>,BOC 调制相对传统的 BPSK(binary phase shift keying)调制而言,是将基带信号能量搬移至偏移中心频率  $\pm f_s$  处,使得一个频点可以发射多个信号分量,给导航模拟测试提出了新的要求和挑战,相关研究较少。

本文主要考虑面向北斗新体制 BOC 信号的模拟仿真与测试,以 B1C 为例进行讨论。介绍了 B1C 信号体制,给出伪距迭代计算方法,介绍时延滤波技术,基于开源软件接收机验证自生成的北斗 B1C 信号正确性,并对定位结果误差进行分析。

## 1 B1C BOC 信号体制

### 1.1 B1C 信号格式

B1C 信号的复包络表示为<sup>[18]</sup>:

$$s_{B1C}(t) = s_{B1C\_data}(t) + js_{B1C\_pilot}(t) \quad (1)$$

其中,  $s_{B1C\_data}(t)$  为数据分量,  $s_{B1C\_pilot}(t)$  为导频分量,  $j$  为虚数单位,数据分量与导频分量的功率比为 1 : 3,两个分量的数学表达式如下:

$$s_{B1C\_data}(t) = \frac{1}{2}D_{B1C\_data}(t) \cdot C_{B1C\_data}(t) \cdot sc_{B1C\_data}(t) \quad (2)$$

$$s_{B1C\_pilot}(t) = \frac{\sqrt{3}}{2}C_{B1C\_pilot}(t) \cdot sc_{B1C\_pilot}(t) \quad (3)$$

其中,  $D_{B1C\_data}(t)$  为导航电文数据,  $C_{B1C\_data}(t)$  和  $C_{B1C\_pilot}(t)$  为测距码,  $sc_{B1C\_data}(t)$  和  $sc_{B1C\_pilot}(t)$  为子载波。其中 B1C 数据分量的子载波  $sc_{B1C\_data}(t)$  表达式为:

$$sc_{B1C\_data}(t) = \text{sign}(\sin(2\pi f_{sc\_B1C\_a}t)) \quad (4)$$

式中:  $f_{sc\_B1C\_a}$  为 1.023 MHz。

B1C 导频分量的子载波  $sc_{B1C\_pilot}(t)$  为 QMBOC(6,1,4/33)复合子载波,由相互正交的 BOC(1,1)子载波和 BOC(6,1)子载波组合构成,二者功率比为 29 : 4。  $sc_{B1C\_pilot}(t)$  表达式如下:

$$sc_{B1C\_pilot}(t) = \sqrt{\frac{29}{33}}\text{sign}(\sin(2\pi f_{sc\_B1C\_a}t)) - j$$

$$\sqrt{\frac{4}{33}}\text{sign}(\sin(2\pi f_{sc\_B1C\_b}t)) \quad (5)$$

其中,  $f_{sc\_B1C\_b}$  为 6.138 MHz。由式(1)~(5)可得 B1C 信号复包络表示。

### 1.2 B1C 测距码生成

B1C 信号测距码采用分层码结构设计,由主码和子

码相异或构成,B1C 数据分量和导频分量测距码参数一览表如表 1 所示,B1C 数据分量由 Weil 码截断产生,B1C 导频分量由 Weil 主/子码复合产生。可见对于 B1C 测距码而言,Weil 码生成是关键。

表 1 B1C 信号测距码参数

Table 1 B1C range code

信号分量	主码码型	主码码长	主码周期	子码码长	子码码长	子码周期
数据	Weil	10 230	10 ms	—	—	—
导频	Weil	10 230	10 ms	Weil	1 800	18 000 ms

一个码长为  $N$  的 Weil 码序列可定义为:

$$W(k;w) = L(k) \oplus L((k+w)\text{bmod}N), k=0,1,2,\dots, N-1 \quad (6)$$

式中:  $L(k)$  为码长为  $N$  的 legendre 序列;  $w$  表示两个 legendre 序列之间的相位差。码长为  $N$  的 legendre 序列  $L(k)$  可根据下式定义产生:

$$L(k) = \begin{cases} 0, & k=0 \\ 1, & k \neq 0, \text{ 且存在整数 } x, \text{ 使得 } k = x^2 \text{bmod}N \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $\text{mod}$  表示求模运算。

通过对上述码长为  $N$  的 Weil 码序列进行循环截短,即可得到码长为  $N_0$  的测距码,即截短序列为:

$$c(n;w;p) = W((n+p-1)\text{bmod}N;w), n=0,1,2,\dots, N_0-1 \quad (8)$$

式中:  $p$  为截取点,表示从 Weil 码的第  $p$  位开始截取,取值范围为  $1-N$ 。

### 1.3 B1C 导航电文生成

B1C 信号采用 B-CNAV1 电文格式,导航电文调制在 B1C 数据分量上,每帧电文长度为 1 800 符号位,符号速率为 100 sps,播发周期为 18 s。基本的帧结构定义如图 1 所示。



图 1 B1C B-CNAV1 结构导航电文

Fig. 1 B1C B-CNAV1 navigation message

从帧结构组成中可看出,要组装成正确的导航电文,不但要按照帧结构顺序填充星历/历书,还要编写 BCH 编码、LDPC 编码以及 CRC 循环冗余校验相关代码。

#### 1) CRC 循环冗余校验

B1C 首先采用循环冗余校验(CRC)对子帧 2、3 进行

编排, B1C 采用 24 bit 循环冗余校验码。其生成多项式为:

$$g(x) = \sum_{i=0}^{24} g_i x^i \quad (9)$$

其中,  $g_i = \begin{cases} 1, & i=0,1,3,4,5,6,7,10,11,14,17,18,23,24 \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$

设待校验导航电文为长度为  $k$  的信息序列  $m_i (i = 1 \sim k)$  可表示为如下多项式:

$$m(x) = m_k + m_{k-1}x + m_{k-2}x^2 + \dots + m_1x^{k-1} \quad (10)$$

多项式  $m(x)$  通过补 0 除以生成多项式  $g(x)$ , 得到余式即为 CRC 校验序列。

### 2) BCH 编码

子帧 1 采用 BCH(21, 6) 和 BCH(51, 8) 进行编码, BCH 编码生成多项式如表 2 所示。

表 2 BCH 编码生成多项式

Table 2 BCH code generator polynomial

BCH 编码	编码参数 n	编码参数 k	生成多项式 $g(x)$
(21, 6)	21	6	$x^6 + x^4 + x^2 + x + 1$
(51, 8)	51	8	$x^8 + x^7 + x^4 + x^3 + x^2 + x + 1$

其中, 子帧 1 表示测距码编号及系统时间参数中的小时内秒计数 (seconds of hour, SOH)。

### 3) LDPC 编码与交织

LDPC (low density parity check code) 编码称为低密度奇偶校验码, 子帧 2、3 在进行 CRC 校验之后, 分别采用 64 进制 LDPC(200, 100) 编码和 LDPC(88, 44) 编码, 以 64 进制 LDPC(200, 100) 编码为例进行说明, 首先由校验矩阵  $H = [H_1, H_2]$  计算得到生成矩阵  $G$ , 利用生成矩阵  $G$  对长度为 100 的输入序列  $m$  进行 LDPC 编码, 得到总长度为 200 的码字  $c = (c_0, c_1, \dots, c_{199}) = m \cdot G = [m, p]$ 。其中,  $c_j (0 \leq j \leq 199)$  为码字  $c$  中的第  $j$  个码字符号,  $p = m \cdot (H_2^{-1} \cdot H_1)^T$  为校验序列。

得到生成矩阵的方法:

(1) 将  $100 \times 200$  的  $H$  矩阵表示为  $H = [H_1, H_2]$ , 其中  $H_1$  大小为  $100 \times 100$ ,  $H_2$  大小为  $100 \times 100$ ;

(2) 将矩阵  $H$  转化为系统形式, 用  $H_2^{-1}$  左乘  $H$ , 得到转换矩阵  $\hat{H} = [H_2^{-1} \cdot H_1, I_{100}]$ , 其中  $I_{100}$  为  $100 \times 100$  单位阵;

(3) 进而得到生成矩阵  $G = [I_{100}, (H_2^{-1} \cdot H_1)^T]$ 。

## 2 伪距迭代计算

导航接收机采用相关测量方法获得对卫星的伪距观测数据, 在现实世界中, 接收机只能得到测量数据的接收时刻, 而不知信号自卫星播发时所对应的星钟时刻, 因此

在仿真过程中, 需要通过接收时刻反推计算卫星发射信号时刻的星钟时刻。

观测伪距  $\rho'$  包括两个部分: 星地真实几何距离  $\rho$  和星地钟差等效距离  $c\delta t$ :

$$\rho' = \rho + c\delta t \quad (11)$$

其中:

$$\rho = \rho_0 + \delta\rho_{lon} + \delta\rho_{Tro} + \delta\rho_{Rel} + \delta\rho_{Off} + \delta\rho_{Noise} \quad (12)$$

$$c\delta t = c(\delta t_k - \delta t^s)$$

考虑原子钟稳定性极高, 忽略接收机本地和卫星钟面时与北斗系统时之间的误差, 设导航接收机于接收机钟面时  $T_{rece}$  开始仿真, 设导航信号在空间中传播延迟为, 则卫星发射该信号的发射北斗系统时  $T_{send}$  为:

$$T_{send} = T_{rece} - \tau \quad (13)$$

由式(11)、(12)和(13)可得  $\tau$  计算公式:

$$\tau = \frac{R(T_{rece} - \tau, T_{rece})}{c} + \delta\rho_{lon} + \delta\rho_{Tro} + \delta\rho_{Rel} + \delta\rho_{Off} + \delta\rho_{Noise} \quad (14)$$

其中,  $R(T_{rece} - \tau, T_{rece})$  为  $T_{rece} - \tau$  时刻卫星位置到  $T_{rece}$  时刻接收机位置的几何距离,  $\delta\rho_{lon}$ 、 $\delta\rho_{Tro}$ 、 $\delta\rho_{Rel}$ 、 $\delta\rho_{Off}$ 、 $\delta\rho_{Noise}$  分别为电离层、对流层、相对论效应、相位中心偏移以及噪声引起的延迟, 采用迭代法, 设初始迭代时:

$$\begin{cases} \tau_0 = 0 \\ R_0 = R(T_{rece} - \tau_0, T_{rece}) \end{cases} \quad (15)$$

其中,  $R_0$  为初始迭代的星地真实几何距离,  $(T_{rece} - \tau_0)$  时刻卫星位置可由卫星轨道模型计算得到, ECEF 坐标系下卫星坐标可表示为:

$(X^s(T_{rece} - \tau_0), Y^s(T_{rece} - \tau_0), Z^s(T_{rece} - \tau_0))^T, T_{rece}$  时刻导航接收机位置为已知量, 因此有:

$$R_0 = \sqrt{[X^s(T_{rece}) - X_k(T_{rece})]^2 + [Y^s(T_{rece}) - Y_k(T_{rece})]^2 + [Z^s(T_{rece}) - Z_k(T_{rece})]^2} \quad (16)$$

后续迭代过程按如下顺序进行:

1)  $\tau_i = R_{i-1}/c$ ;

2) 计算  $(T_{rece} - \tau_i)$  时刻卫星位置, 并完成对卫星坐标的地球自转修正;

3)  $\exists \varepsilon$ , 计算式(17), 当  $|R_i - R_{i-1}| < \varepsilon$  时停止循环。

$$R_i = R(T_{rece}, T_{rece}) + \delta\rho_{lon} + \delta\rho_{Tro} + \delta\rho_{Rel} + \delta\rho_{Off} + \delta\rho_{Noise} \quad (17)$$

最终得到迭代伪距值为:

$$\rho' = c(\delta t_k + \tau - \delta t^s) \quad (18)$$

式中:  $\delta t_k$  为本地钟差,  $\delta t^s$  为卫星钟差。

## 3 时延滤波技术

在对高精度波形的延迟控制方面, 目前主流的方式

为时延滤波<sup>[19]</sup>和直接数字频率合成技术。本文采用时延滤波方法生成,重点是借助数字信号处理的方法完成小数时延,将小数采样看成对带限连续信号的重采样过程。

首先对原始信号进行  $M_0$  倍插值,采样间隔变为  $T_s/M_0$ ,其中  $T_s$  为采样周期,将原始采样信号  $x_a(nT_s)$  两点间插入  $M_0 - 1$  个零值:

$$x_{M_0}(n) = \begin{cases} x_a(n/M_0), & n = kM_0, k = 0, 1, 2, 3, \dots \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (19)$$

频谱扩展为原频谱的  $M_0$  倍,可将  $x_0(n)$  信号重写为  $x_{M_0}(n)$ :

$$x_{M_0}(nM_0 + m) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} h(kM_0 + m)x(n - k) \quad (20)$$

插值后的信号  $x_{M_0}(n)$  被分为  $M_0$  个相位点,余数不同的采样点具有不同的滤波器,令  $\tau = mT_s/M_0$ ,则有:

$$x_a(t - \tau) |_{t=nT_s} = x_{M_0}(nM_0 + m) \quad (21)$$

综上所述,延时信号  $x_a(t - \tau)$  可表示为非延时取样  $x(n)$  和一个特定滤波器的卷积实现,将  $h_{m_0}(n) = h(nM_0 + m)$  称为延时滤波器,其中延时是指  $\tau$  从  $0 \sim T_s$  之间的小数延时。

### 4 试验验证

使用 MATLAB 软件将北斗新体制 B1C BOC 信号产生分为测距码生成函数、B1C 电文生成函数、伪距迭代计算函数及 B1C 基带信号生成函数 4 个部分。试验部分借助 Github 网站开源 BDS3 B1C/B2a 软件接收机验证<sup>[20]</sup>。

#### 4.1 BOC B1C 基带信号生成

由 1.2 节内容,分别预保存已生成的 B1C 数据分量和导频分量测距码。基于美国宇航局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) CDDIS 网站下载某日北斗卫星导航电文,设定仿真时间为 2023 年 1 月 3 日零时,仿真用户位于 (116°E, 40°N),高度 100 m。经过可见性判别,筛选满足可见性要求的卫星编号,待满足卫星数量要求时,根据 1.3 节内容编排导航电文。采用伪距迭代计算方法,得到按  $T_p$  采样周期等间隔排列的伪距迭代值。最后基于时延滤波技术生成北斗 B1C BOC 基带信号,并放入 BDS3 B1C/B2a 开源软件接收机验证结果正确性,信号生成流程如图 2 所示。

#### 4.2 仿真验证

仿真场景如表 3 所示,其中仿真时间和用户仿真点如 4.1 节所设。

基于自生成的 B1C BOC 信号及 BDS3 B1C/B2a 开源软件接收机,得到频域 B1C BOC 信号表示如图 3(a) 所示,时域 I/Q 路表示如图 3(b)、(c) 所示。

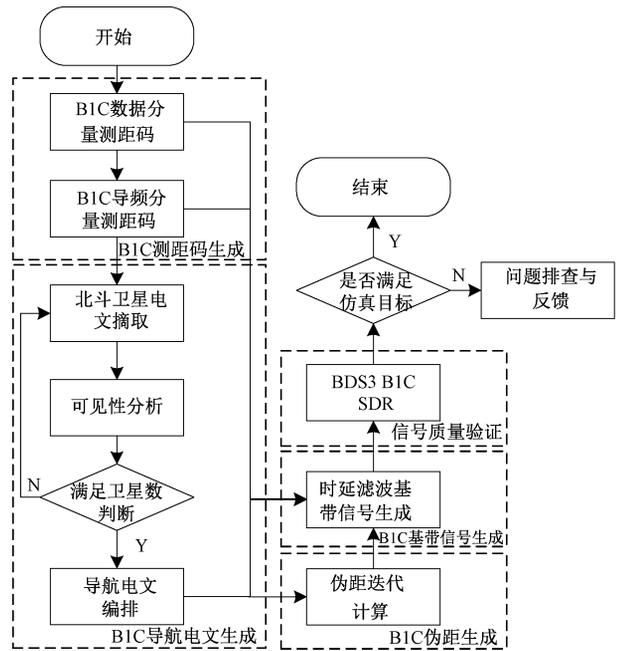


图 2 B1C BOC 基带信号生成与验证流程

Fig. 2 Flow chart of B1C BOC baseband signal generation and verification

表 3 仿真场景

Table 3 Simulation scene

基带中心频率/ MHz	采样率/ MHz	位宽/ bit	仿真卫星编号 (PRN)
0	40	8	(6, 13, 16, 19, 20, 22, 36, 38)

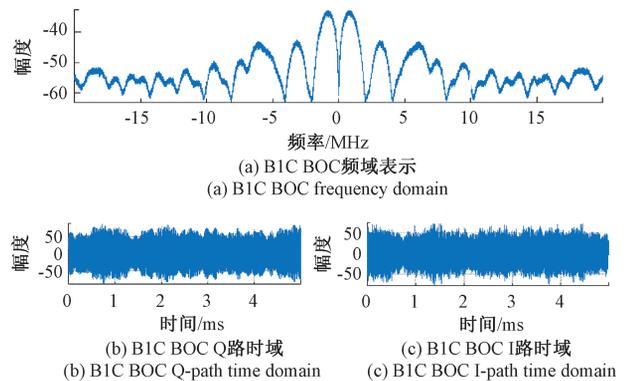


图 3 B1C BOC 基带信号时频域结果

Fig. 3 B1C BOC baseband signal time-frequency domain results

捕获结果如图 4 所示,可见自生成基带信号可被软件接收机成功捕获,经过软件接收机跟踪、解调、定位,可得最终定位结果如图 5 所示。统计在测量周期 200 ms,定位次数 94 次条件下,通用横墨卡托网格系统中的三维定位误差方差为 0.74 m,二维定位误差方差为 0.43 m。

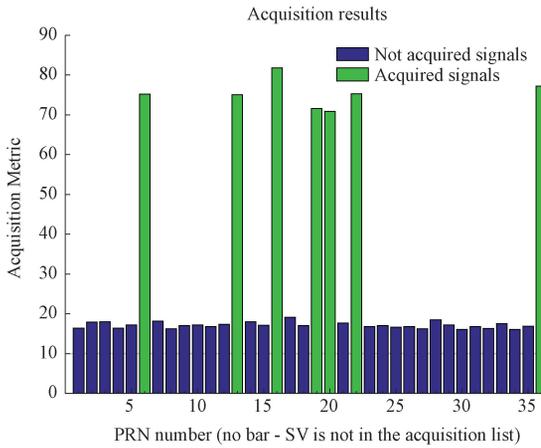


图 4 B1C BOC 基带信号捕获结果

Fig. 4 B1C BOC baseband signal capture results

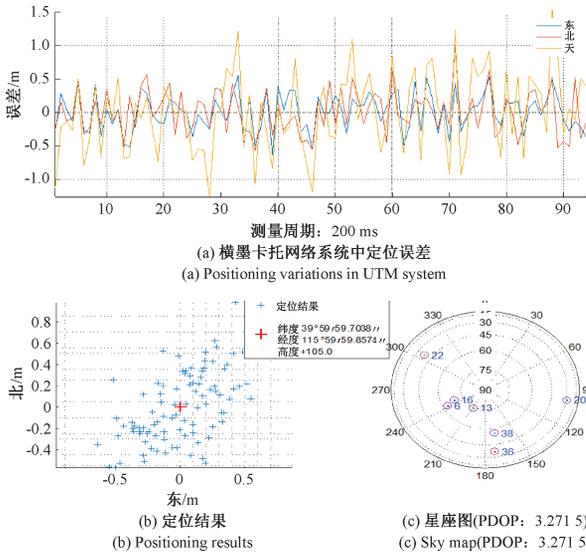


图 5 B1C BOC 基带信号定位结果

Fig. 5 B1C BOC baseband signal positioning results

### 5 结 论

本文以北斗 B1C 为例,基于伪距迭代和时延滤波技术实现了对北斗新体制 BOC 信号的仿真模拟,并使用开源软件接收机平台对自生成的基带信号进行了验证,结果表明其三维定位误差方差优于 0.74 m,二维定位误差方差优于 0.43 m。下一步将结合 X310 等软件无线电平台和商用导航接收机,对模拟信号进行进一步测试评估。

### 参考文献

[ 1 ] 杨俊,陈建云,钟小鹏,等. 高精度延迟信号产生理论与技术及其在卫星导航系统试验验证中的应用[C]. 中国卫星导航学术年会,2010.

YANG J, CHEN J Y, ZHONG X P, et al. High precision delay satellite navigation signal generation theory and application in navigation satellite simulation test [ C ]. China Satellite Navigation Conference ( CSNC ), 2010.

[ 2 ] 周顺. 卫星导航多径信道建模与仿真关键技术研究[M]. 国防科技大学,2022.

ZHOU SH. Research on the Key Technologies of Satellite Navigation Multipath Channel Modeling and Simulation[M]. National University of Defense Technology,2022.

[ 3 ] 黄文德,王芳,刘沉,等. 基于 BDSim 的卫星导航系统级测试及地面操作人员培训方法[J]. 电子测量技术,2021,44(19):50-56.

HUANG W D, WANG F, LIU CH, et al. BDSim-A GNSS simulation tool for system-level tests and OCS operators' training[J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(19):50-56.

[ 4 ] 眭晨阳,宋茂忠. Galileo/GPS 卫星导航模拟源的 FPGA 算法设计与实现[J]. 电子测量技术,2019,42(5):23-28.

SUI CH Y, SONG M ZH. Design and implement of FPGA algorithm for Galileo/GPS satellite navigation signal simulator [ J ]. Electronic Measurement Technology, 2019,42(5):23-28.

[ 5 ] ZHANG X, GONG H, XIAO Z B, et al. Analysis of channel dynamic delay effect on satellite navigation channel simulation system [ C ]. 2012 Second International Conference on Instrumentation, Measurement, Computer, Communication and Control, Harbin, China, 2012:1342-1345.

[ 6 ] 彭明,王田,薛仁魁,等. 基于模拟器的辅助导航测试方法研究[J]. 宇航计测技术,2019,39(6):90-93.

PENG M, WANG T, XUE R K, et al. Research on assisted navigation test method based on simulator[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2019, 39(6):90-93.

[ 7 ] 窦汝鹏,孙佳骏,吴飞燕,等. 车载导航接收机性能测试与分析[J]. 汽车电器,2019,375(11):7-10.

DOU R P, SUN J J, WU F Y, et al. Testing and analysis of navigation receiver performance [ J ]. Automobile Electric Appliance, 2019, 375(11):7-10.

[ 8 ] 马超,刘宗敏,杨俊,等. 反无人机导航欺骗技术发展与应用[J]. 国防科技,2023,44(3):59-67.

MA CH, LIU Z M, YANG J, et al. Development and application of UAV GPS spoofing techniques [ J ]. National Defense Science & Technology, 2023, 44(3):59-67.

[ 9 ] 刘鹏,陈思源,任婵婵,等. 卫星导航欺骗式干扰抑制技术研究与分析[J]. 导航定位与授时,2020,7(4):

123-130.

LIU P, CHEN S Y, REN CH CH, et al. Research and analysis of anti-spoofing technology for satellite navigation [J]. Navigation Positioning & Timing, 2020, 7(4): 123-130.

- [10] GAO Y J, LI G Y. A slowly varying spoofing algorithm avoiding tightly-coupled GNSS/IMU with multiple anti-spoofing techniques [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2022, 71(8): 8864-8876.
- [11] LIU X, LI J, XU T, et al. Research on GNSS anti-spoofing interference algorithm based on multi-receiver [C]. 2019 IEEE International Conference on Signal, Information and Data Processing (ICSIDP), Chongqing, China, 2019: 1-6.
- [12] MEDINA D, LASS C, MARCOS E P, et al. On GNSS jamming threat from the maritime navigation perspective [C]. 2019 22th International Conference on Information Fusion (FUSION), Ottawa, ON, Canada, 2019: 1-7.
- [13] CHEN J. Research on deception jamming detection method for Beidou satellite navigation [C]. 2022 6th International Conference on Automation, Control and Robots (ICACR), Shanghai, China, 2022: 191-194.
- [14] YAO Z, ZHANG J, LU M. ACE-BOC: Dual-frequency constant envelope multiplexing for satellite navigation [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2016, 52(1): 466-485.
- [15] GUO F, YAO Z, LU M. BS-ACEBOC: A generalized low-complexity dual-frequency constant-envelope multiplexing modulation for GNSS [J]. GPS Solutions, 2017, 21: 561-575.
- [16] YAO Z, GAO Y, LU M. Generalized theory of BOC signal unambiguous tracking with two-dimensional loops [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2017, 53(6): 3056-3069.
- [17] GAO Y, YAO Z, LU M. Theoretical analysis of unambiguous 2-D tracking loop performance for band-limited BOC signals [J]. GPS Solutions, 2018, 22.
- [18] 中国卫星导航系统管理办公室. 北斗卫星导航系统空间信号接口控制文件公开服务信号 B1C(1.0版)[R]. 2017. China Satellite Navigation System Management Office. Beidou Satellite Navigation System Space Signal Interface Control file Open Service Signal B1C[R]. 2017.
- [19] 刘文山, 王瑛, 边郎. 基于分数时延滤波器的导航信号精密时延调整方法与实现 [C]. 第十四届中国卫星导航年会, 2023.
- LIU W SH, WANG Y, BIAN L. Method and achievement of precision time delay adjustment of navigation signals based on fractional time delay filters [C]. China Satellite Navigation Conference (CSNC), 2023.

- [20] LI Y, SHIVARAMAIAH N C, AKOS D M, et al. Design and implementation of an open-source BDS-3 B1C/B2a SDR receiver [J]. GPS Solutions, 2019, 23.

## 作者简介



**马超**, 2021年于国防科技大学获得博士学位, 现为国防科技大学智能科学学院副教授, 主要研究方向为时空信息安全。

E-mail: machao14@nudt.edu.cn

**Ma Chao** received his Ph. D. degree from National University of Defense Technology in 2021. He is currently an associate researcher at the College of Intelligent Science, National University of Defense Technology. His main research interest includes the space-time information security.



**瞿智**, 2016年于国防科技大学获得博士学位, 现为国防科技大学智能科学学院副教授, 主要研究方向为天基智能与时频同步。

E-mail: qu27@163.com

**Qu Zhi** received his Ph. D. degree from National University of Defense Technology in 2016. He is currently an associate professor at the College of Intelligent Science, National University of Defense Technology. His main research interests include space intelligence and time-frequency synchronization.



**李献斌**, 2015年于国防科技大学获得博士学位, 现为国防科技大学智能科学学院副研究员, 主要研究方向为卫星通信、天基智能。

E-mail: lixianbin23@nudt.edu.cn

**Li Xianbin** received his Ph. D. degree from National University of Defense Technology in 2015. He is currently an associate researcher at the College of Intelligent Science, National University of Defense Technology. His main research interests include satellite communications and space intelligence.



**周超** (通信作者), 2017年于国防科技大学获得博士学位, 现为国防科技大学智能科学学院副教授, 主要研究方向为时空信息安全、卫星导航安全应用及无人系统反制。

E-mail: zhouchao@nudt.edu.cn

**Zhou Chao** (Corresponding author) received his Ph. D. degree from National University of Defense Technology in 2017. He is currently an associate professor at the College of Intelligent Science, National University of Defense Technology. His main research interests include space-time information security, satellite navigation safety applications and unmanned system countermeasures.