

文章编号: 2095-4980(2020)02-0208-07

宽带干扰背景下的多阵元卫星导航信号模拟

王晓君, 甄云双*

(河北科技大学 信息科学与工程学院, 河北 石家庄 050000)

摘要: 近年来全球导航卫星系统(GNSS)抗干扰技术逐渐成为研究热点, 在抗干扰研究中, 宽带干扰背景下的多阵元卫星导航信号模拟发挥着至关重要的作用。为了提高抗干扰研究效率, 通过 Matlab 模拟的方法研究了卫星导航软件接收机入口数字中频信号的模拟问题。根据信干噪比进行功率控制, 分别对卫星导航信号、干扰信号和噪声信号进行建模, 计算阵列天线带来的延时, 最后模拟了宽带干扰背景下阵列天线的卫星信号并设计了图形用户(GUI)界面。在模拟完成后, 将信号输入到抗干扰算法的研究系统进行测试, 解决了抗干扰研究中复杂的干扰信号源模拟问题, 提高了抗干扰研究的工作效率, 同时验证了本研究的实用性和正确性。

关键词: 导航信号模拟; 高斯白噪声; 干扰信号; 多阵元; 信噪比

中图分类号: TN972⁺.1

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2019125

Simulation of satellite navigation signal on array antenna under the context of broadband interference

WANG Xiaojun, ZHEN Yunshuang*

(College of Information Science and Engineering, Hebei University of Science, Shijiazhuang Hebei 050000, China)

Abstract: In recent years, anti-interference technology of Global Navigation Satellite System(GNSS) has gradually become a research hotspot. In anti-interference research, satellite navigation signal simulation on array antennas in the context of broadband interference plays a vital role. In order to improve the efficiency of anti-interference research, the simulation problem of digital Intermediate Frequency(IF) signal at the entrance of satellite navigation software receiver is studied by Matlab. Firstly, power control is performed according to the signal to interference and noise ratio. Then satellite navigation signals, interference signals and noise signals are modeled separately. And then the delay caused by the array antenna is calculated. Finally, the satellite signals of the array antenna in the background of broadband interference are simulated and the Graphical User Interface(GUI) is designed. After the simulation, the signal is input into the research system of the anti-interference algorithm. It implements the complex interference signal source simulation in anti-interference research, improves its efficiency and verifies its practicability and correctness.

Keywords: navigation signal simulation; Gaussian white noise; interference signal; multiple array elements; signal to noise ratio

随着电子对抗受到全球的高度关注, 干扰和抗干扰技术得到了飞速发展, 尤其是以自适应滤波为代表的全球导航卫星系统(GNSS)抗干扰技术^[1]。由于导航信号类型多, 导航参数和干扰信号参数各不相同^[2], 研究抗干扰算法时, 需对接收机入口信号的相应参数进行复杂的设定和调整^[3]。为了提供方便研究抗干扰算法的环境, 本文针对宽带干扰背景下的多阵元卫星导航信号模拟方法进行研究。相比以往模拟源, 本研究将多阵元、多种干扰方式和多种卫星导航信号集中到一个模拟源中, 使得模拟源更加完善^[4], 可供选择的干扰信号和卫星信号更丰富, 进而提高了抗干扰研究的效率。

收稿日期: 2019-04-16; 修回日期: 2019-05-07

作者简介: 王晓君(1973-), 男, 博士, 主要研究方向为卫星导航接收机及其关键技术。email:miracl@hebust.edu.cn

*通信作者: 甄云双 email:535777129@qq.com

本文的研究内容主要包括两部分：一是建立卫星导航数字中频信号模拟数学模型，其中包括噪声信号、干扰信号、GPS/北斗卫星导航信号的信号模型，多阵元延时计算数学模型以及信噪比的实现模型；二是对如何通过 Matlab 实现干扰背景下多阵元的导航信号模拟的方法进行了研究，建立流程图，对信号进行了模拟。

1 信号模拟基本原理

模拟的输入抗干扰软件接收机数字中频信号其原理框图如图 1 所示。首先，在信号模拟前设置数字信号的采样频率、中频频率并对信号进行功率控制；其次，分别建立导航、干扰、噪声信号的数学模型。在导航信号模拟模块中首先进行导航信号类型、卫星号、载噪比、导航信号来向的设置，再进行导航信号模拟，最后加多阵元延时模拟出导航信号；在干扰信号模拟模块中首先进行干扰带宽、频偏、干信比、干扰信号来向的设置，再进行干扰信号模拟，最后添加多阵元延时模拟出干扰信号；在噪声信号模拟模块中首先进行噪声带宽、噪声中心频率、噪声功率的设置，然后模拟出噪声信号；最后，3 种信号相加合成宽带干扰背景下的多阵元卫星导航信号，成为抗干扰软件接收机的输入。

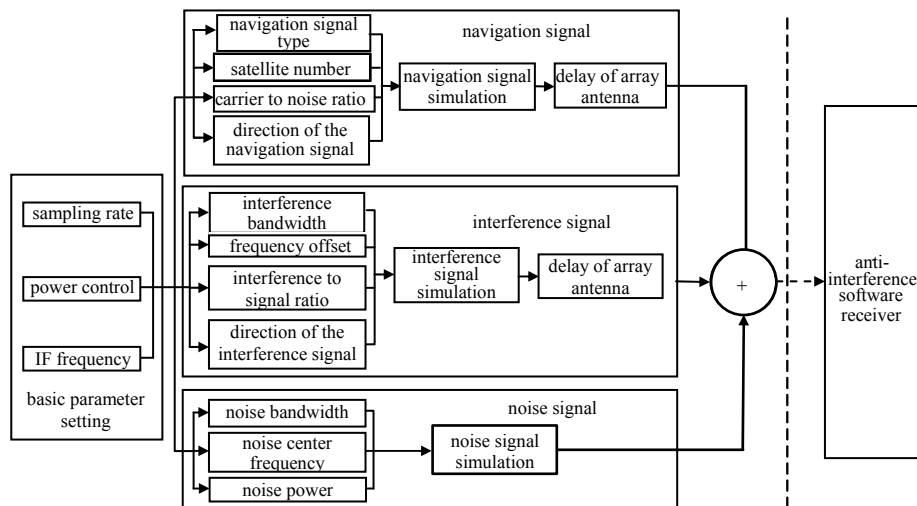


Fig.1 Block diagram of navigation signal simulation
图 1 导航信号模拟基本原理框图

2 信噪比的设定

信号 $x(n)$ 由导航信号 $s(n)$ 、干扰信号 $j(n)$ 和噪声信号 $n(n)$ 相加得到^[5]，如式(1)所示：

$$x(n) = s(n) + j(n) + n(n) \tag{1}$$

它们之间的功率关系是信号模拟的关键，可以通过信号的载噪比和干信比来设定导航信号功率和干扰信号功率。

载噪比的计算公式^[6]为：

$$CN_0 = R_{SN} \times B_n \tag{2}$$

式中： B_n 为设定的噪声信号带宽； R_{SN} 为信噪比，其计算公式如下：

$$R_{SN} = 10 \lg \frac{P_s}{P_n} \tag{3}$$

式中 P_n 为噪声信号平均功率。根据式(3)，给定噪声信号的功率就可以计算出导航信号的平均功率 P_s 值。

根据干信比(Jamming to Signal Ratio, JSR)计算公式可以得到干扰信号的功率，干信比的表达式为：

$$R_{JS} = 10 \lg \frac{P_j}{P_s} \tag{4}$$

通过设定的干信比，以及由式(3)计算得到的 P_s 值，可得到干扰信号的功率 P_j 。

信号模拟了天线入口的信号，在工程实现上往往要对其电平进行固定，即控制信号的功率。最有效的方法是功率归一化。已知归一后 $x(n)$ 的功率为 1 W，则信号功率的放大系数 coh 为：

$$coh = \sqrt{\frac{P}{1}} \tag{5}$$

式中 P 是经过统计得到的信号源 $x(t)$ 的平均功率，最后将统计得到的功率乘以放大系数。

在模拟信号时，功率控制的流程图如图 2 所示，先设定噪声功率、载噪比和干信比，然后计算出导航信号功率和干扰信号功率。最后将总功率进行归一化。

3 信号模拟

信号模拟了输入到抗干扰软件接收机的一定采样频率下的数字中频信号。它由卫星导航信号、干扰信号和噪声信号相加得到，这里分别介绍卫星导航信号、干扰信号和噪声信号的模拟方法。

3.1 卫星导航信号

本节模拟了 GPS 信号、北斗 B1 和 B3 信号共 3 种卫星导航信号。卫星导航信号由导航电文、码和载波构成。信号生成时，导航电文和码先进行扩频调制，然后两者的组合码再通过双相移位键控 (Binary Phase Shift Keying, BPSK) 对载波进行调制^[7]。信号的数学模型^[8] $s^{(i)}(n)$ 可表示为：

$$s^{(i)}(n) = \sqrt{2P_s} (x^{(i)}(n) D^{(i)}(n)) \sin \left(2\pi f_c \left(\frac{n}{f_s} \right) + \theta \right) \tag{6}$$

式中： $n=1,2,\dots,N$ ， $x^{(i)}(n)$ 为第 i 颗卫星产生的 C/A 码(北斗为测距码)； $D^{(i)}(n)$ 为卫星 i 播发的数据码电平值； f_c 为载波频率，其值见表 1； θ 为载波的初始相位； f_s 为信号采样频率。

表 1 导航信号参数

Table1 Parameters of navigation signal

signal type	polynomial	shift register number/a	code rate/Mcps	carrier frequency f_c /MHz
GPS	$G1(x) = 1 + x^1 + x^{10}$	10	1.023	1 575.42
	$G2(x) = 1 + x^2 + x^3 + x^6 + x^8 + x^9 + x^{10}$			
Beidou B1	$G1(x) = 1 + x + x^7 + x^8 + x^9 + x^{10} + x^{11}$	11	2.046	1 561.098
	$G2(x) = 1 + x + x^2 + x^3 + x^4 + x^5 + x^8 + x^9 + x^{11}$			
Beidou B3	$G1(x) = 1 + x + x^7 + x^8 + x^{13}$	13	10.230	1 268.52
	$G2(x) = 1 + x + x^2 + x^6 + x^7 + x^9 + x^{10} + x^{12} + x^{13}$			

1) 数据码 $D^{(i)}(n)$ 模拟：它的数学模型是一系列二进制的数字。由于真实的卫星信号数据码结构复杂，数据较大，在不影响卫星导航信号特征的前提下，自定义了数据结构模拟数据码，如图 3 所示。图中只用了真实导航电文中一个子帧。若以北斗 D1 导航电文形式调制，还需将 NH 码以模二和形式与扩频码和导航电文同步调制^[9]。

2) 伪码模拟：它由 2 个移位寄存器组成的多项式进行模二和后得到。不同类型导航信号的寄存器构成如表 1 所示，此外还要注意根据多普勒频移，对码进行伸缩。

3) 载波模拟：要注意它的频率、多普勒频率。其表达式为：

$$c(n) = \cos \left(2\pi (f_c + f_d) \frac{n}{f_s} \right) \tag{7}$$

式中： f_d 为多普勒频移，随时间的变化而变化。由于信号从卫星到接收机接收处理需要经过下变频，在模拟时载波用中频频率 f_1 。

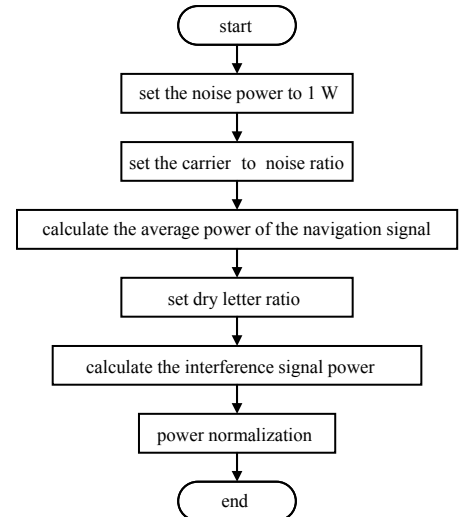


Fig.2 Flow chart of power control
图 2 功率控制流程图

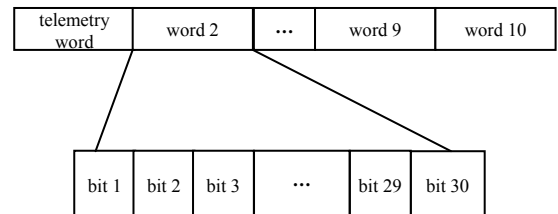


Fig.3 Code structure of customized data
图 3 自定义数据码结构图

卫星信号模拟的流程如图 4 所示，确定卫星类型之后，生成寄存器得到伪码，生成载波和电文，将伪码电文扩频调制后再与载波进行 BPSK 调制，模拟出卫星信号。

3.2 干扰信号

在导航系统中，压制式干扰可分为宽带干扰和窄带干扰^[10]，而单一干扰信号可划分为：脉冲、扫频、窄带、宽带、跳频干扰等^[11]。本节模拟了线性调频、窄带、BPSK 调制以及扫频这几种干扰信号。

干扰频偏 d 指在信号带宽内相对中心频率允许偏差的值，常用来调整频带的位置，计算公式如下：

$$d = \frac{f_0 - f_1}{0.5 \times B_s} \quad (8)$$

式中： f_0 为所需的干扰信号频率； B_s 为导航信号的带宽。

线性调频信号(Linear Frequency Modulation, LFM)是一种大时间-带宽积的非平稳信号，频谱在整个带宽内比较平坦，带外衰减很快，能量在带宽内非常集中^[12]，是一种常用的干扰信号，LFM 信号 $j_1(n)$ 的模型为：

$$j_1(n) = A \cos \left(2\pi f_0 \left(\frac{n}{f_s} \right) + \pi k \left(\frac{n}{f_s} \right)^2 + \varphi \right) \quad (9)$$

式中： A 由 P_j 换算得到；调频率 $k = 20 \times \frac{f_s}{L}$ ， L 为信号序列长度；初相 $\varphi(n) = 2\pi(f_c - f_0) \left(\frac{n}{f_s} \right)$ 。

当干扰信号的频谱为冲激信号时，可视为窄带干扰信号进行模拟，让其频率远小于载波中心频率，用 f'_0 表示，再对余弦信号进行采样后得到数字信号，模型为：

$$j_2(n) = A \cos \left(2\pi f'_0 \left(\frac{n}{f_s} \right) + \varphi' \right) \quad (10)$$

BPSK 调制信号是调相的代表，BPSK 指载波的相位随信号 1 或 0 而改变，通常情况下用相位 0° 和 180° 来表示 1 和 0，因此 BPSK 已调信号可表示为^[13]：

$$j_3(t) = \left[\sum_n a_n g(t - nT_s) \right] \cos \omega_c t \quad (11)$$

式中： $a_n = \begin{cases} +1, & \text{概率为 } P \\ -1, & \text{概率为 } 1-P \end{cases}$ ； $g(t - nT_s)$ 为调制信号的时域波形。

扫频干扰信号的频率随时间线性变化，在时域或频域都不具有能量聚集的特性。它的模型为^[14]：

$$j_4(n) = A \cos \left(2\pi f_0(n) \times \frac{n}{f_s} \right) \quad (12)$$

式中 $f_0(n) = f_0'' + k \times \frac{n}{f_s}$ 为随着时间线性变化的频率， f_0'' 为初始频率， k 为扫频率。

模拟干扰信号流程如图 5 所示，选择干扰信号类型，设置干扰信号频偏，最后根据模型生成干扰信号。

3.3 噪声信号

模拟带限噪声信号 $n(n)$ 的数学模型如式(13)所示：

$$n(n) = P_{ni} \cos \left(2\pi f_1 \frac{n}{f_s} \right) - P_{ni} \sin \left(2\pi f_1 \frac{n}{f_s} \right) \quad (13)$$

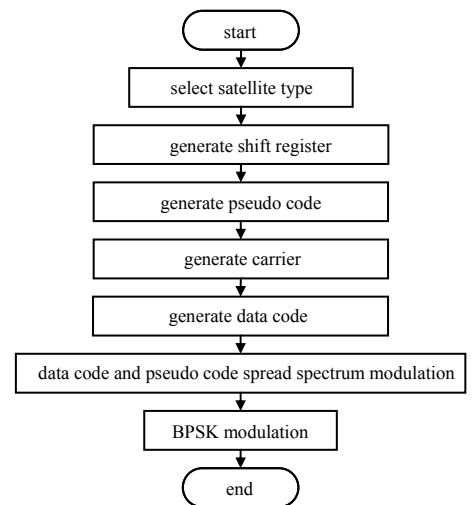


Fig.4 Flow of satellite signal simulation
图 4 卫星信号模拟流程图

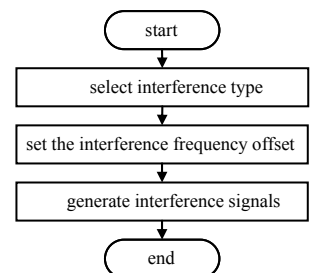


Fig.5 Flow of interference signal simulation
图 5 干扰信号模拟流程图

式中 P_{ni} 和 P_{nq} 分别为噪声信号在 I 和 Q 支路的幅值，它是根据噪声带宽 B_n 和采样率 f_s 确定的低通滤波器系数，再通过滤波器之后得到。

噪声信号模拟流程如图 6 所示，设定其带宽和频率为卫星信号的带宽和频率，经过低通滤波器生成噪声，统计其平均功率，并归一化。

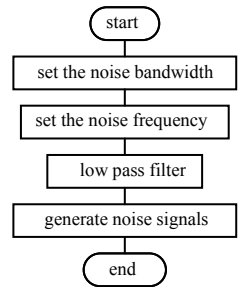


Fig.6 Flow of noise signal simulation
图 6 噪声信号模拟流程图

4 M 阵元

多阵元天线能够区分出信号的方向，广泛用于抗欺骗干扰的研究^[15]，在模拟多阵元卫星导航信号时，根据信号到达阵元天线上的延时不同来模拟多阵元的效果，这里介绍多阵元的延时计算和延时在模拟时如何实现的问题。

4.1 延时计算

假设信号来向的俯仰角为 θ ，水平方向的方位角为 φ ，阵元个数为 M ，阵元排列的间距为 r ，以图 7(a)所示的线阵布局为例，带箭头加粗的平行线表示入射信号，以阵元 A 为 0 延时点，每个阵元以 r 为间距线性排开。信号到达第 m 个阵元上的延时 τ 可由式(14)得到：

$$\tau = (r(m-1)\sin\theta\cos(\varphi)) / c \tag{14}$$

同理可得，不带圆心的圆阵(图 7(b)所示)延时计算公式为：

$$\tau = \left(r \sin\theta \cos\left(\varphi - 2\pi \frac{m-2}{M-1}\right) \right) / c \tag{15}$$

带圆心的圆阵(图 7(c)所示)延时计算公式为：

$$\tau = \left(r \sin\theta \cos\left(\varphi - 2\pi \frac{m-2}{M-2}\right) \right) / c \tag{16}$$

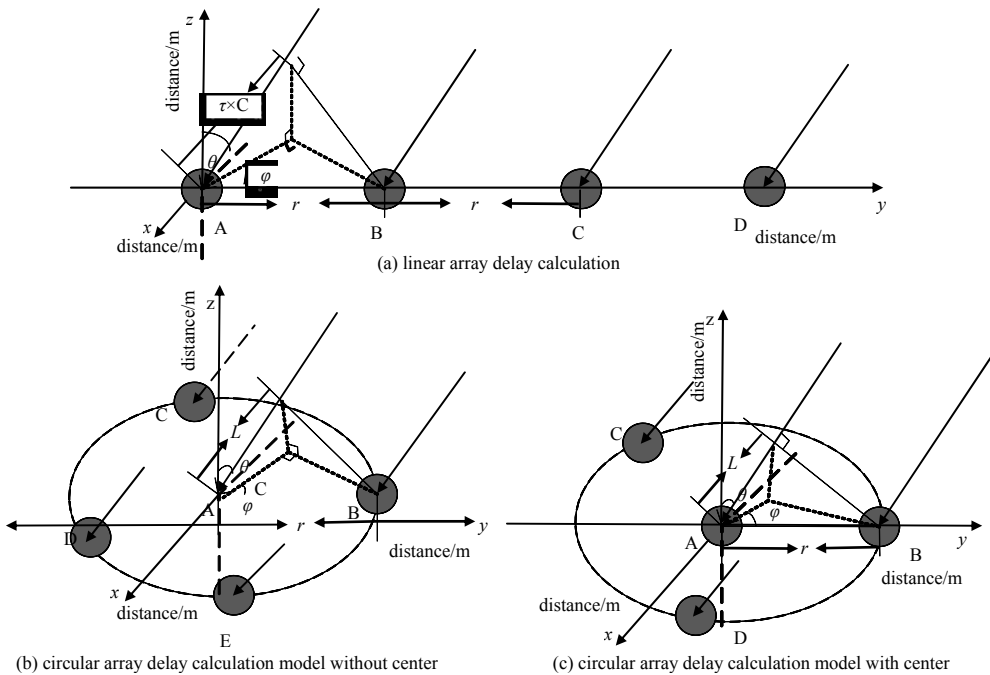


Fig.7 Model of multi-array time delay calculation
图 7 多阵元延时计算模型

4.2 实现方法

模拟信号发射出去后，接收机接收到信号要先去载波，使其变为中频信号，所以在模拟导航信号时，多阵元导致的延时 τ_c 的差异进而引起的载波相位 φ_{ct} 变化为：

$$\varphi_{ct} = 2\pi f_c \tau_c \tag{17}$$

在干扰信号模拟时，要根据干扰信号的模拟表达式，将其中的 t 改为延时 τ_j 之后的 t' ，即 $t' = t - \tau_j$ 。

5 信号模拟测试

在 Matlab 软件中进行宽带干扰背景下的多阵元卫星导航信号的模拟，流程图如图 8 所示，首先进行功率控制，确定各信号功率，然后计算多阵元的延时，分别生成噪声、干扰、卫星导航信号，最后 3 种信号相加得到最终信号。在采样率 62 MHz 下产生 1 s 的信号，在 Matlab 中运行时长约 1.26 s。但运行效率不仅和算法有关，还和软件版本、电脑型号等相关。

图 9 为本仿真的图形化界面(Graphical User Interface, GUI), 它可以通过对基本参数、导航信号、干扰信号的设置实现多种带干扰的卫星导航信号的模拟生成，这些设置可以实时保存到结果显示的界面，并且能够对生成的信号进行保存和加载，在图片的右侧显示的 2 个波形是按照图片中的参数设置得到的信号时域图和频域图。时域图为在 62 MHz 的采样率下，含圆心的七阵元下加了干扰和噪声的卫星导航信号时域波形图；在频域图中可以看出该干扰为窄带干扰。若在此基础上改变干扰的带宽为 0.1 MHz，它的频域图如图 10 所示，可以看到频域中的明显改变。此外，本仿真系统还作为抗干扰仿真算法研究系统的输入进行了测试，验证了信号模拟的正确性和实用性。

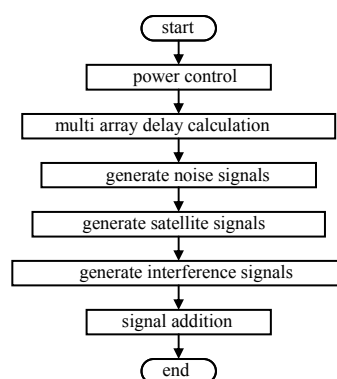


Fig.8 Flow of signal simulation
图 8 信号模拟流程图

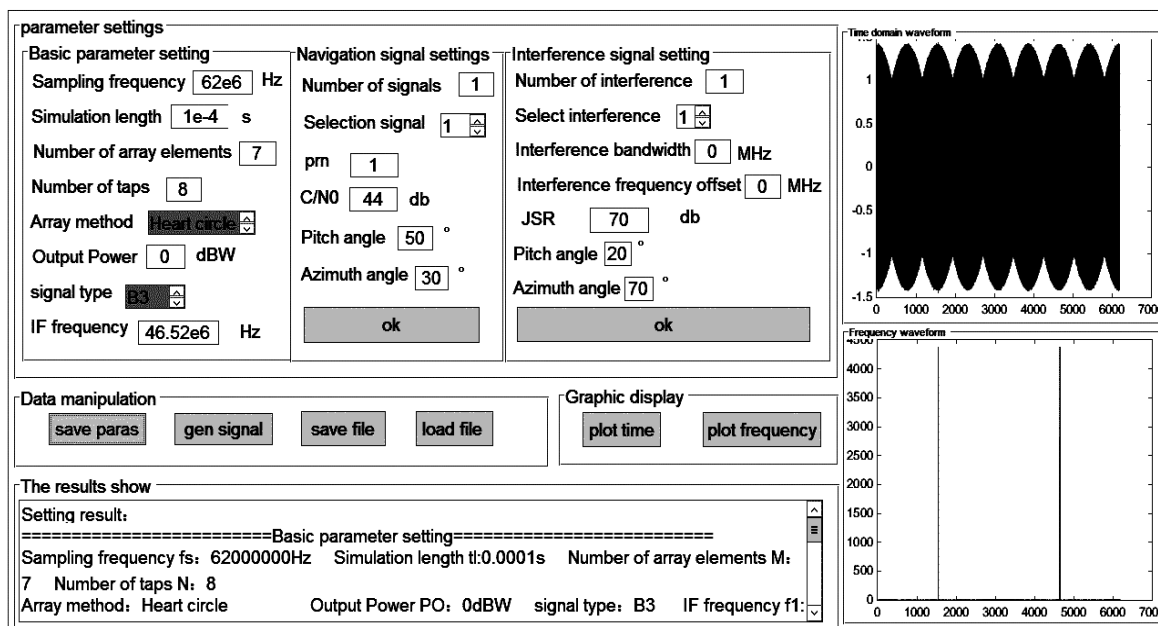


Fig.9 GUI interface of signal source generation simulation system
图 9 信号源模拟仿真系统 GUI 界面

6 结论

本文通过控制干信噪比来控制各个信号的功率，完成了对 GPS 信号北斗 B1、B3 信号的模拟、噪声信号的模拟、干扰信号的模拟，并实现了多阵元。用 Matlab 实现了各个环节的仿真，并设计出了信号模拟的 GUI 界面。经过验证，该模拟为抗干扰算法研究提供了输入来源，从而提高研究效率。

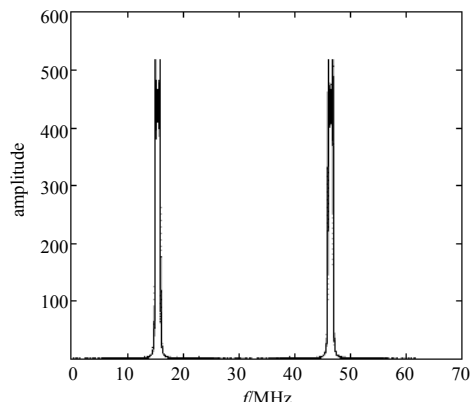


Fig.10 Frequency domain diagram at 0.1 MHz bandwidth
图 10 0.1 MHz 带宽下的频域图

参考文献:

- [1] 刘雪淋,张磊. 基于多天线的 GNSS 抗欺骗干扰定位算法研究与实现[C]// 中国高科技产业化研究会智能信息处理产业化分会. 北京:中国高科技产业化研究会, 2018:4. (LIU Xuelin,ZHANG Lei. Research and implementation of GNSS anti-spoofing interference localization algorithm based on multi-antenna[C]// China Hi-Tech Industrialization Research Association Intelligent Information Processing Industrialization Branch. Beijing:China Intelligent Industrialization Research Institute of High-tech Industrialization:China High-Tech Industrialization Research Association, 2018:4.)
- [2] 郝蓓. GPS 信号的抗干扰捕获算法研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2017. (HAO Bei. Research on anti-interference acquisition algorithm of GPS signal[D]. Xi'an,China:Xidian University, 2017.)
- [3] 李纯标,时小飞,杨开伟. 基于降维空时自适应信号处理的多阵元宽带干扰抑制方法[J]. 数字通信世界, 2017(3):1-4. (LI Chunbiao,SHI Xiaofei,YANG Kaiwei. Multi-array broadband interference suppression method based on adaptive space-time adaptive signal processing[J]. Digital Communication World, 2017(3):1-4.)
- [4] 曹义昆,丁传红,郝春朝. 卫星导航信号模拟源的发展现状及趋势[J]. 中国新通信, 2016,18(12):144. (CAO Yikun,DING Chuanhong,HAO Chunhao. Development status and trend of satellite navigation signal analog sources[J]. China New Communications, 2016,18(12):144.)
- [5] 杨腾飞. GPS 卫星导航信号仿真研究[D]. 杭州:浙江理工大学, 2016. (YANG Tengfei. Simulation of GPS satellite navigation signals[D]. Hangzhou,China:Zhejiang University of Science and Technology, 2016.)
- [6] 谢钢. GPS 原理与接收机设计[M]. 北京:电子工业出版社, 2009. (XIE Gang. GPS principle and receiver design[M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry, 2009.)
- [7] 杨国艺. GPS 多通道中频信号源研制[D]. 南昌:华东交通大学, 2016. (YANG Guoyi. Development of GPS multi-channel IF signal source[D]. Nanchang,China:East China Jiaotong University, 2016.)
- [8] 王晓宇. Galileo 卫星导航系统中频信号仿真技术研究[D]. 北京:北京理工大学, 2015. (WANG Xiaoyu. Research on IF signal simulation technology of Galileo satellite navigation system[D]. Beijing:Beijing Institute of Technology, 2015.)
- [9] 邹佩. 北斗卫星导航系统仿真研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2017. (ZOU Pei. Simulation of Beidou satellite navigation system[D]. Xi'an,China:Xidian University, 2017.)
- [10] 郭旭强. 北斗卫星导航干扰检测与识别技术研究[D]. 北京:北京交通大学, 2018. (GUO Xuqiang. Research on Beidou satellite navigation interference detection and identification technology[D]. Beijing:Beijing Jiaotong University, 2018.)
- [11] 郑晓冬. 卫星导航系统复杂干扰信号模拟源设计[D]. 成都:电子科技大学, 2012. (ZHENG Xiaodong. Design of analog source for complex interference signals in satellite navigation system[D]. Chengdu,China:University of Electronic Science and Technology of China, 2012.)
- [12] 汪洋,程林,胡泽辉. 对线性调频体制雷达的调频干扰设计与仿真[J]. 舰船电子对抗, 2016,39(5):38-41,63. (WANG Yang,CHENG Lin,HU Zehui. Design and simulation of FM jamming for linear frequency modulation system radar[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2016,39(5):38-41,63.)
- [13] 王继祥,李宏,刘贵忠. 基于调制识别理论的 BPSK 信号干扰效果评估[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2008,6(5):363-366. (WANG Jixiang,LI Hong,LIU Guizhong. Evaluation of BPSK signal interference effect based on modulation recognition theory[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2008,6(5):363-366.)
- [14] 孟小曼,孙克文. 基于 Wigner-Hough 变换的卫星导航接收机扫频干扰信号检测[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2018,41(11):1502-1505,1543. (MENG Xiaoman,SUN Kewen. Detection of swept interference signals in satellite navigation receiver based on Wigner-Hough transform[J]. Journal of Hefei University of Technology(Natural Science), 2018,41(11):1502-1505,1543.)
- [15] 李津,刘博,王淑君,等. 一种基于多阵元天线的 GPS 抗欺骗干扰方法[J]. 电子信息对抗技术, 2017,32(3):62-66. (LI Jin,LIU Bo,WANG Shujun,et al. A GPS anti-spoofing interference method based on multi-array antenna[J]. Electronic Information Countermeasure Technology, 2017,32(3):62-66.)