

# GPS 最优压制式干扰信号研究

王 角, 苏 中, 张月霞

(北京信息科技大学 高动态导航技术北京市重点实验室, 北京 100101)

**摘要:** 针对 GPS 最优干扰信号评估方法欠缺的问题, 提出了利用接收机误码率判断最优干扰信号的方法; 通过对卫星导航接收机工作原理的研究, 建立了卫星导航接收机模型; 通过接收机不同模块对导航信号处理过程的研究, 建立了基于中频信号的误码率模型; 利用仿真工具模拟不同干扰信号, 研究不同干扰环境下接收机的误码率; 通过改变干扰信号功率得到误码率与干信比的关系曲线, 比较不同干扰信号同干信比下接收机的误码率, 得到最优干扰信号; 通过实验验证, 在接收机干信比允许范围内, 相同干扰信号功率下, 伪码相关干扰信号干扰效果最优, 为卫星导航信号干扰设备的研发及设计提供了依据。

**关键词:** 最优干扰信号; MATLAB 仿真工具; 误码率; 干信比; 伪码相关

## Study on Optimal Jamming Signal of GPS System

Wang Jiao, Su Zhong, Zhang Yuexia

(Beijing Key Laboratory of High Dynamic Navigation Technology, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100101, China)

**Abstract:** Due to the problem of the lack of evaluation method for GPS optimal jamming signal, the method of judging the optimal jamming signal by using error rate is proposed. A satellite navigation receiver model is established through the research on the working principle of the satellite navigation receiver, and a bit error rate model based on the intermediate frequency signal is established via the research on the processing of navigation signal by the different modules of the receiver. The error rate of the receiver under different interference conditions is studied take the advantage of the simulation of different interference signals using simulation tools. The relationship curve between the error rate and the ISR (InterferenceSignal Ratio) is obtained by changing the power of the interference signal. Then the optimal jamming signal is obtained by comparing the error rate under the different interference signals in the same ISR. Through the experimental verification, under the circumstances of the same interference signal power, the PN related code signal effect is optimal when in the receiver ISR range, which provides a basis for the development and design of the satellite navigation signal jamming equipment.

**Keywords:** optimal jamming signal; MATLAB simulation tool; bit error rate; ISR; PN code correlation

## 0 引言

卫星导航可以在全球范围内为海陆空用户提供全天候的、连续精确的位置、速度和时间信息<sup>[1]</sup>, 其在国家政治、军事和经济生活中发挥着越来越重要的作用<sup>[2]</sup>。尤其是 GPS 在几次战争中的成功实践, 充分展现了现代卫星导航系统的重大军事利用价值<sup>[3]</sup>。如果能够有效遏制敌方导航信号将对整个战局产生重大的影响, 因此, 研究 GPS 导航干扰技术具有重要的现实意义。

目前, 卫星干扰技术主要有两种: 压制式干扰和欺骗式干扰。欺骗式干扰通过产生一个与卫星导航信号十分相似的伪卫星信号, 通过诱导接收机捕获使得接收机得到错误的定位<sup>[4]</sup>, 由于卫星接收机在锁定模式下很难捕获其他卫星, 因而欺骗式干扰很难实现。

压制式干扰利用干扰信号频率和卫星导航信号中心频率一

致的特点, 使得接收机在接收到导航信号的同时接收到干扰信号。由于 GPS 导航信号到达地面时功率极小, 极易被大功率、同频段的信号掩盖<sup>[5]</sup>, 因此, 压制式卫星导航干扰技术已成为各国研究的热点。近年来, 英国 QinetiQ 公司、美国 INTERFEROMETRICS INC 公司、法国 THALES 公司和 Alcatel 公司以及国内都分别推出了各自的卫星导航干扰系统<sup>[6]</sup>。虽然这些系统都对 GPS 具有良好的干扰效果, 但缺乏对干扰效果的定量评估。

本文根据 GPS 卫星导航接收机的基本原理, 针对干扰信号效果评估手段欠缺的问题, 采用扩频调制及解调技术建立了卫星导航接收机模型和基于中频信号的误码率模型, 通过分析不同干扰信号下接收机误码率情况, 得到了最优干扰信号。

## 1 GPS 接收机建模分析

导航接收机作为 GPS 导航系统终端设备, 负责对接收到的信号进行处理并通过解算得出位置信息。当导航信号受到干扰时, 接收机无法分离出卫星导航信号, 导致无法完成定位, 接收机失效。

### 1.1 GPS 接收机工作原理

GPS 接收机由射频前端、基带数字信号处理、输入输出接口、接收机控制、导航解算、精密定位 6 个模块组成<sup>[7]</sup>, 其组成如图 1 所示。

射频前端将接收机天线接收到的信号经过增益控制、下变频、滤波等处理, 将卫星导航射频信号转变成所需中频信号。

收稿日期: 2015-11-04; 修回日期: 2015-11-11。

基金项目: 国家自然科学基金(61261160497); 十二五预先研究项目(9071223301)。

作者简介: 王 角(1992-), 男, 硕士研究生, 主要从事卫星导航信号处理及干扰方向的研究。

苏 中(1962-), 男, 博士, 教授, 主要从事微惯性器件, 高动态 IMU 及组合导航方向的研究。

张月霞(1978-), 女, 博士, 副教授, 主要从事卫星导航信号干扰和移动通信方向的研究。

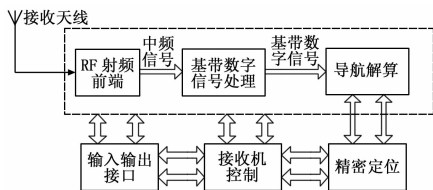


图 1 GPS 接收机组框图

中频信号经过 AD 转换及采样获得基带数字信号，通过基带运算完成对各个卫星基带数字信号的解扩、解调等处理，获得时间、卫星位置等原始数据；导航定位结算模块通过对达到时间的计算得到伪距信息，利用卫星位置等信息计算出三维信息；输入输出接口负责整个接收机的数据流传递与交互；接收机控制负责协调监控各模块间的工作，保证系统的实时性和稳定性；精密定位模块则根据辅助观测结果或者外部输入的差分数据，完成对接收机的高精度定位功能。卫星导航接收机的工作流程如图 2 所示。

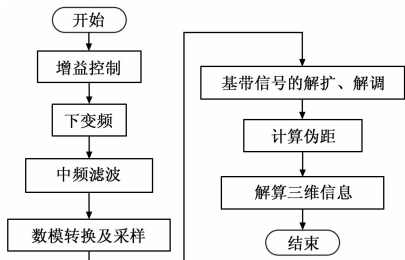


图 2 GPS 接收机工作流程图

### 1.2 GPS 接收机建模及仿真

为了研究不同干扰信号的干扰效果，需对接收机进行建模分析，即对 GPS 接收机每个模块的处理后的信号进行仿真。由 GPS 接收机的原理可知，GPS 导航接收机在工作状态下接收到的信号有 GPS 导航信号、信道噪声和外部干扰信号。故 GPS 接收机接收到的信号可以表示为：

$$R(t) = S(t) + N(t) + I(t) \quad (1)$$

其中： $S(t)$  表示 GPS 导航信号， $N(t)$  表示信道噪声， $I(t)$  为外部干扰信号。

GPS 导航信号每个导航数据长度为 300 bit，每个导航数据包含 20 个 C/A 码组 (1023 位)，每组 C/A 码包含 1 540 个载波。当每个载波按照 8 个采样点计算时，每个导航数据的仿真数据<sup>[8]</sup>为：

$$300 \times 20 \times 1023 \times 1540 \times 8 = 75620160000 \quad (2)$$

由于数据量太大，导致仿真速度太慢，从而无法仿真。考虑到接收机的工作模式，卫星导航射频信号经过低噪放和下变频模块，得到中频信号。此过程中没有对卫星导航信号进行解调处理，所以中频信号包含了所有导航电文信息，因此考虑从接收机下变频之后进行仿真。一般情况下，中频信号频率为 10.23 MHz<sup>[9]</sup>，则每组 C/A 码包含 10 个中频载波，每个导航数据的仿真数据为：

$$300 \times 20 \times 1023 \times 10 \times 8 = 491040000 \quad (3)$$

比较式 (2) 和式 (3) 可以发现，经过简化，在减小仿真数据量的同时保证了数据信号的完整性。

信道噪声采用无线信道中应用极其广泛的高斯白噪声信号。由于它在一定带宽范围内，均值为零，功率分布均匀，是

一种理想的随机信号。

外部干扰信号一般为卫星导航信号传输中受到的来自外界有目的性的干扰信号，其信号频率同卫星导航信号频率一致，且功率远大于卫星导航信号的功率，可以使得一定范围内的接收机失效。由于本节重点讨论接收机的工作原理，故暂时忽略外部干扰信号对接收机的影响。

在对卫星导航合理简化后，需对卫星导航信号进行仿真。由于卫星导航信号经由无线信道传输，信号中必定存在信道噪声。图 3 为卫星导航接收机在工作模式下接收到卫星中频信号，其频率为 10.23 MHz，信道噪声采用高斯白噪声。卫星导航接收机通过对卫星导航中频信号进行解调、解扩、门限判别等处理，得到的导航电文如图 4 所示。

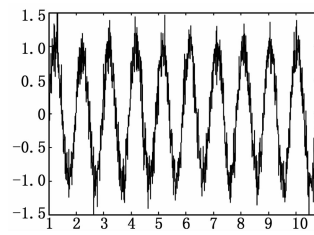


图 3 经无线信道传输的卫星导航中频信号

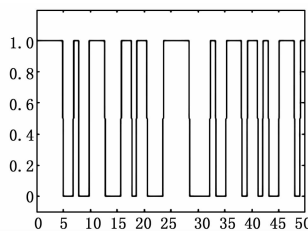


图 4 解调后的导航电文

## 2 误码率模型

一般情况下，接收机接收到 GPS 导航信号后，相关器对接收到的信号进行相关扩解，将相关器的输出经过带通滤波器即可得到有用信号，解调出三维位置信息<sup>[10]</sup>。当受到人为干扰时，导航接收机收到信号的信干比减小，经过相关解调器之后得到的信号误码率增加，当误码率达到一定值后，接收机将无法正常定位<sup>[11]</sup>。

### 2.1 干扰信号种类

本文中涉及的外部干扰信号有 4 种：

1) 连续波干扰。连续波干扰也称为单音干扰，作为一种常见的干扰样式，连续波易于产生。但是由于其干扰信号频谱较窄，不能完全覆盖 GPS 信号频段，故其干扰效果最差。

2) 白噪声干扰。白噪声信号为自然界中最为常见的干扰信号，其所有频率具有相同的能量密度。故其频谱较宽，但由于信号功率谱较为平均，经滤波之后，进入相关器的能量较少，干扰效果次之。

3) 二进制相移键控干扰。二进制相移键控 (Binary Phase Shift Keying, BPSK) 干扰是一种宽带干扰。干扰信号通过 BPSK 调制，使干扰信号具有一定的带宽，可以完全覆盖 GPS 信号频段，具有较好的干扰效果。

4) 伪码相关干扰。伪码相关干扰也是一种宽带干扰，但是在干扰信号的调制时，基带信号选用同 GPS 信号一样的伪随机码，由于伪码相关干扰信号与卫星信号相类似，进入相关器的能量相比其他会更强，干扰效果最好。

### 2.2 干信比计算

导航信号受到人为干扰时，若信噪比在允许的范围内，接收机仍会正常进行解调。但信噪比过低，也会导致相关器无法接收，找不到与本地参考信号相关的信号进行解扩。为了评估各种干扰信号的干扰效果，故将干信比控制在接收机允许的范围之内<sup>[13-14]</sup>。

2.2.1 导航信号功率计算

卫星导航信号采用 BPSK 调制方式, 其信号可以表示为:

$$s(t) = \begin{cases} A_g(t)\cos\omega_0 t & \text{发送 "0" 时} \\ A_g(t)\cos(\omega_0 t + \pi) & \text{发送 "1" 时} \end{cases} \quad (4)$$

其中:  $A$  为载波振幅,  $g(t)$  为基带码元信号,  $\omega_0$  为载波角速率。

则信号功率谱密度可以表示为:

$$P_s(f) = \frac{A^2}{4} [P(f+f_0) + P(f-f_0)] \quad (5)$$

其中:  $P(f)$  为基带码元信号的频谱, 对于 GPS 信号而言, 其码元为伪随机码, 其频谱可表示为:

$$P(f) = f_c P(1-P) |G_1(f) - G_2(f)|^2 + |f_c [PG_1(0) + (1-P)G_2(0)]|^2 \delta(f) \quad (6)$$

其中:  $G_1(f)$  表示伪随机码为 1 时其频谱,  $G_2(f)$  表示伪随机码为 -1 时其频谱,  $P$  是伪随机码为 1 的概率,  $1-P$  是伪随机码为 -1 的概率,  $f_c$  为码元速率,  $\delta(f)$  为狄拉克函数, 在其整个定义域上的积分等于 1。

对于 BPSK 调制的卫星导航信号而言,  $g_1(t) = -g_2(t)$ , 且码元等概率出现。由于码元信号均为矩形脉冲, 其频谱  $G_1(f) = -G_2(f)$ , 将式 (6) 代入式 (5), 化简为:

$$P_s(f) = \frac{A^2}{4} f_c [ |G_1(f+f_0)|^2 + |G_1(f-f_0)|^2 ] \quad (7)$$

则其功率可通过式 (8) 计算:

$$P = \int_{-\infty}^{\infty} P_s(f) df \quad (8)$$

2.2.2 干扰信号的功率计算

本文涉及的干扰信号有 4 种: 1) 连续波干扰, 2) 高斯白噪声干扰, 3) BPSK 干扰, 4) 伪码相关干扰。

对于连续波干扰, 采用同 GPS 信号频率一致的正弦波, 其功率谱密度可表示为:

$$P_{cw}(f) = \frac{A^2}{2} [\delta(f-f_0) + \delta(f+f_0)] \quad (9)$$

其中:  $A$  为干扰信号振幅,  $f_0$  为干扰信号的频率,

对于白噪声信号, 其功率谱密度即为其方差, 考虑到白噪声的频谱为双边带信号, 故可表示为:

$$P_{wGN}(f) = \frac{\sigma^2}{2} \quad (10)$$

其中:  $\sigma^2$  为信号方差。

对于 BPSK 干扰和伪码相关干扰, 其调制方式均同 GPS 信号一致, 故其功率谱密度计算同 GPS 信号一致。则其功率亦可以通过式 (8) 计算。

2.3 误码率计算

根据上述论述, 当干信比控制在接收机允许的范围之内, 其仍可以正常解调出导航电文。为了评估不同干扰信号的干扰情况, 适当依次增大干扰信号功率, 将含有干扰信号的卫星导航信号进行解调, 得到的导航电文同原导航电文进行比较, 得到误码率与干信比曲线。评估不同干扰信号干扰效果<sup>[15]</sup>。

3 仿真分析

根据上述论述, 仿真流程如图 5 所示。

由图 5 可知, 首先产生 GPS 仿真信号、信道噪声和多种模式的干扰信号, 将 GPS 仿真信号与干扰信号及信号噪声相叠加得到含有干扰的 GPS 导航信号, 通过对含有干扰的 GPS

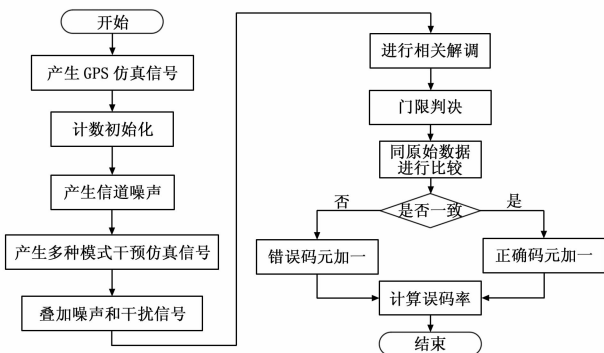


图 5 多模 GPS 卫星压制仿真流程图

导航信号进行相关解调、门限判决等操作, 将得到的二进制码元与原始码元进行比较, 计算误码率, 评估干扰效果<sup>[16]</sup>。

3.1 干扰信号的产生

1) 连续波干扰采用和载波一样频率的正弦波, 幅值为 1, 这样可以避免被带通滤波器滤除;

2) 高斯白噪声实际为一组符合标准正态分布的随机数, 其功率由随机数组的方差决定;

3) BPSK 干扰信号为通过对随机数进行二进制相移键控调制得到的 BPSK 调制信号。为了使得产生的干扰信号同 GPS 信号带宽一样, 随机数的速率需要同 GPS 信号的 C/A 码速率一样;

4) 伪码相关干扰信号需要先产生伪随机码, 首先产生两个长度为 10 的随机数, 通过特征多项式:

$$\begin{cases} G_1 = 1 + x^3 + x^{10} \\ G_2 = 1 + x^2 + x^3 + x^6 + x^8 + x^9 + x^{10} \end{cases} \quad (11)$$

将 10 位随机数进行移位操作, 产生两个 Gold 码  $G_1$  和  $G_2$ , 将产生的 Gold 码  $G_1$  和  $G_2$  进行模二相加, 即可得到伪随机码。将伪随机码进行 BPSK 调制即可得到伪码相关干扰信号。

干扰信号仿真如图 6 所示。

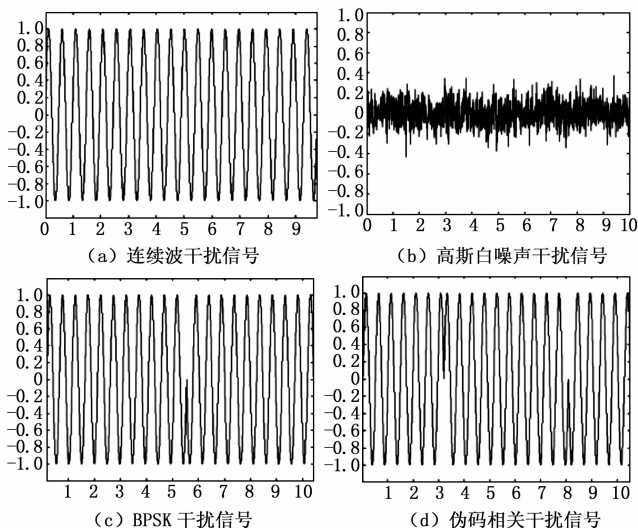


图 6 干扰信号仿真图

3.2 误码率仿真及分析

根据上述设计, 通过 Matlab 仿真得到不同干扰信号下的

误码率如图 7 所示。

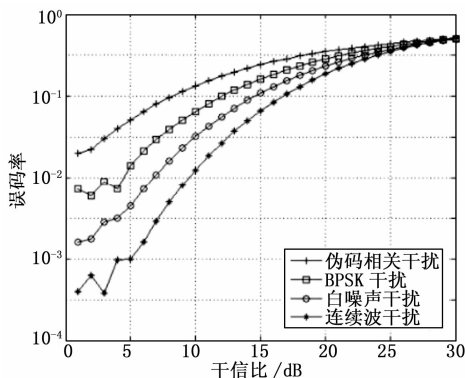


图 7 不同干扰信号下的误码率

由图 7 可知, 当干信比小于 5 dB 时, 误码率和干信比具有较弱的相关性, 当干信比在 5 dB 和 25 dB 之间时, 解调信号的误码率随着干信比的增加而增加; 当干信比大于 25 dB 时, 解调信号的误码率基本不随信干比而变化。

通过比较 4 种信号可以发现, 相同误码率的情况下, 伪码相关干扰干信比最小, 连续波干扰干信比最大。由此可见, 相同干扰信号功率的情况下, 伪码相关干扰效果最好。

### 4 实验验证

本文设计的多模 GPS 卫星压制式干扰机的信号发生装置, 测试时, 考虑到较大的作用范围将对该区域内的民用设备造成干扰, 故以作用范围 50 m 为例, 检测干扰机性能。接收端选用 TR370 卫星接收机, 接收机通过 RS232 和电脑进行通信, 可以实时监测卫星数及信噪比。同时, 为了评估各干扰信号的干扰效果, 接收天线引出一路信号给频谱分析仪, 实时监测干扰信号功率。

在接收机正常工作时, 开启多模 GPS 卫星压制式干扰机, 逐渐增大发射功率, 直至接收机捕获的卫星个数少于 4 颗时, 即导航接收机无法正常结算位置。记录各干扰信号临界功率和干扰效果, 得出最优干扰信号。

图 8~11 分别表示导航接收机无法定位时不同调制方式的干扰信号的最小功率。其功率如表 1 所示。

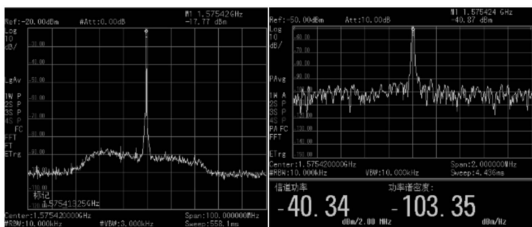


图 8 连续波干扰信号频谱及功率谱密度

表 1 不同干扰信号的临界功率

干扰信号	临界发射功率 /dbm	未被干扰时卫星数	临界时卫星数
连续波信号	-15	9	3
白噪声信号	-30	8	3
BPSK 调制信号	-34	9	2
伪码相关信号	-40	7	3

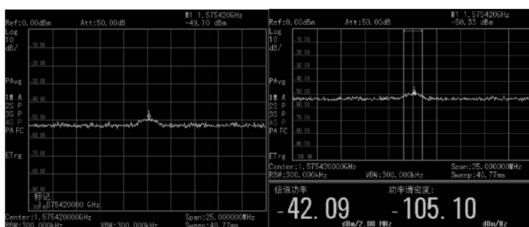


图 9 白噪声干扰信号频谱及功率谱密度

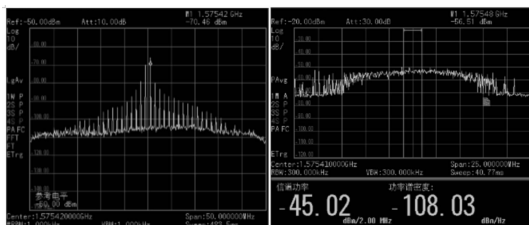


图 10 BPSK 调制方式的干扰信号频谱及功率谱密度

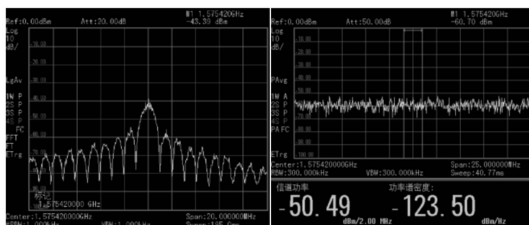


图 11 伪码相关干扰信号频谱及功率谱密度

由于 GPS 卫星导航信号采用直接扩频的调制方式, 具有一定的带宽, 对窄带干扰信号具有一定的抗干扰能力。图 8 显示当干扰信号为连续波时, 由于干扰信号带宽较窄, 不能有效的干扰卫星导航信号。图 9 显示当干扰信号为白噪声时, 由于信号均匀分布, 频谱能量较为均匀, 对带宽达 2 M 的 GPS 信号不能有效的干扰。图 10 显示当干扰信号采用 BPSK 调制方式时, 信号带宽可以达到 2 M, 完全覆盖 GPS 卫星导航信号频段, 可以以较小的功率达到较好的干扰效果。图 11 显示当干扰信号采用伪码相关调制方式时, 由于产生的信号和 GPS 卫星信号具有很强的相关性, 干扰信号功率最小, 干扰效果最好。

### 5 结论

本文分析了压制式干扰方法, 建立了卫星导航接收机模型和基于中频信号的误码率模型, 分析了相同环境下不同干扰信号的干扰效果, 得出最优干扰信号, 为卫星导航信号干扰设备的研发及设计提供了依据。

#### 参考文献:

[1] 王永州, 夏 斌, 马 辉. 基于圆形天线阵的 GPS 抗干扰性能仿真与其干扰方法研究 [J]. 通信技术, 2014, 01: 76-80.  
 [2] 王 森, 朱筱虹, 朱小辉, 等. 国外卫星导航系统的最新发展与思考 [J]. 全球定位系统, 2015, 04: 61-64.  
 [3] 陈忠贵, 帅 平, 曲广吉. 卫星导航系统技术进展 (上) [J]. 中国航天, 2007, 09: 24-29.  
 [4] 姜 鹏, 边少锋, 占奶洲. 基于导航战的 GPS 压制式干扰技术研究 [J]. 舰船电子工程, 2010 (8): 66-680.

(下转第 267 页)

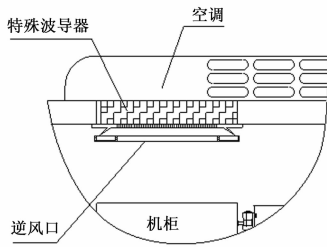


图6 空调孔口波导管示意图

测试后得出,舱体结构中的舱体与门、窗、电源、信号孔口、空调孔口的连接区域是设备、系统电场、磁场内、外影响最大的区域,以致往往造成设备、系统在电磁兼容环境试验中通不过,系统设备工作不稳定、不达标。为此针对该突出情况,我们重点对舱体与门、窗、电源、信号孔口、空调孔口的连接区域进行电磁兼容设计处理,对各个部分的接地连接设计处理,从根本上对辐射源进行充分阻隔与衰减。

#### 2.4 系统设计的技术应用

目前在舱体结构中采取的技术通常有:1.屏蔽技术;2.接地、搭接技术;3.布局、布线技术;4.滤波技术。屏蔽技术就是采用金属板材与金属线材编织网对需要处理的设备体进行封闭,具体设计与选材需依据电场、磁场的波频率、强度进行分析计算;接地、搭接技术就是采用把设备壳体与舱体用金属导线连接导通,使俩体电平相等,并达到接地电阻 $\leq 5\text{ m}\Omega$ ;布局、布线技术就是采用把设备体依据电场、磁场的波频率、强度特征进行相应分布,力求相互影响降到最低;滤波技术就是对设备体中的电源与电路加入滤波电路部分,从设备电路内部对电磁场进行抑制与降低;上述不同的设计处理技术依据电磁兼容原理和工程上制造实际条件来综合处理与应用。

### 3 设计试验结果与分析

方舱结构经过上述系统设计与工程制造处理以后,整个舱体内结构的电磁兼容环境经试验测试,其EMC均达到 $\geq 45\text{ dB}$ 指标,满足整个测发控系统设备在集成之后的环境工作要求,确保了航天测控系统始终处于正常工作环境中,系统的可靠性与性能指标有很大提高。

计算仿真分析如下:

(上接第260页)

- [5] 刘荣,王立平,陈杨. GPS接收机抗干扰性能仿真研究[J]. 无线电通信技术, 2014, 01: 58-60, 64.
- [6] 穆旭成,张鹏,李焯. 卫星干扰定位技术的最新发展动态[J]. 中国无线电, 2014, 12: 58-59, 64.
- [7] Kaplan E D. GPS原理与应用[M]. 北京:电子工业出版社, 2012.
- [8] 李建文,赵勃,张宗麟. 基于软件GPS平台的高动态数字中频信号模拟与实现[J]. 中国惯性技术学报, 2009, 03: 308-312.
- [9] 蔡艳辉,胡锐,程鹏飞,等. 一种基于FPGA+DSP的北斗兼容型高精度接收机系统设计[J]. 导航定位学报, 2013, 02: 1-6.
- [10] 喻红婕,潘成胜. GPS阻塞式压制干扰技术的分析与实现[J]. 沈阳理工大学学报, 2006, 01: 65-67.
- [11] 黄宇达,王俊,找红专,等. 一种基于宽带噪声干扰的GPS信

$$R_t = 20\lg \frac{|(1+K)^2|}{4|K|}$$

$R_t$ : 缝口反射损耗;  $k$ : 波阻抗与孔口入射波阻抗比;  $K = \frac{g}{\pi \cdot r}$ ;  $r$ : 屏蔽体与场源的距离 (cm);  $g$ : 孔口缝隙的长度 (cm)

得出:  $K = \frac{g}{\pi \cdot r} = 5800 / (3.14 \times 11) = 167.9$  代入; 代

$$\text{入 } R_t = 20\lg \frac{|(1+K)^2|}{4|K|} = 44.6\text{ dB}$$

系统二级环境电磁屏蔽指标: 衰减 $\geq 40\text{ dB}$ , 即在150 K~10 GHz频段下, 衰减 $\geq 40\text{ dB}$ 。

### 4 结论

航天器设备系统构造复杂、设备密集,信号、供电系统要求特殊,电路、设备之间、电缆与设备等各种干扰源随处出现。地面设备、支持设备以及航天器研制、发射、运行的地面与空间电磁环境十分复杂。为使设备系统能在工作期间确保正常工作,就必须实施电磁兼容设计与控制的工作。深入研究电磁兼容的技术,以实现机、电、热、电磁兼容一体化设计<sup>[5]</sup>,并做好电磁兼容性测试,达到系统环境的电磁兼容性要求,保证设备系统的安全与可靠,所以电磁兼容设计与应用是航天领域中的重要技术。

通过运载火箭地面测发控系统方舱结构中的电磁兼容技术设计与应用的实现过程,为今后该方面设备系统的研究与设计积累了宝贵经验与案例,同时也为航天产品研制工作的同行在方舱结构电磁屏蔽设计中提供了借鉴与帮助。从中可以看到,今后方舱电磁兼容性技术研究与应用的需求是系统设计工作中的重要部分,必须会从系统中得到进一步重视与加强,应用前景会更加深入和向前发展。

#### 参考文献:

- [1] 杨克俊. 电磁兼容原理与设计技术[M]. 北京:人民邮电出版社, 2007.
- [2] 白同云. 电磁兼容设计实践[M]. 北京:中国电力出版社, 2007.
- [3] 毛勤俭. 方舱设计手册[M]. 河海大学出版社, 2012.
- [4] 赵阳. 电磁兼容工程入门教程[M]. 北京:机械工业出版社, 2009.
- [5] 刘兴俊. 电子设备结构设计中的电磁兼容[J]. 中国新技术新产品, 2015, 6: 12-16.
- 号检测干扰方案设计[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(18): 4409-4412.
- [12] Napolitano A, Perna I. Cyclic spectral analysis of the GPS signal[J]. Digital Signal Processing, 2014, 33: 13-33.
- [13] 张丹,谭惠轩. 一种自适应GPS位同步方式[J]. 电子技术与软件工程, 2014, 05: 54-55.
- [14] Qian Z H, Liu D. Survey on data transmission in bluetooth technology[J]. Journal on Communications, 2012, 33(4): 143-151.
- [15] Wang R, Yao M, Cheng Z, et al. Interference cancellation in GPS receiver using noise subspace tracking algorithm[J]. Signal Processing, 2011, 2(91): 338-343.
- [16] 张瑞,孙希延,纪元法,等. 基于FPGA的三模卫星信号模拟器硬件平台设计[J]. 计算机测量与控制, 2013, 12: 3371-3373.