

### 超外差结构GPS接收机射频前端电路仿真研究

范宇清, 程二威, 魏明, 陈亚洲

引用本文:

范宇清, 程二威, 魏明, 等. 超外差结构GPS接收机射频前端电路仿真研究[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(2): 117-122.

### 您可能感兴趣的其他文章

#### 1. 基于4 bit-CRC反馈网络的高速LVDS传输优化设计

引用本文: 文丰, 张宇, 吴瑞华. 基于4 bit-CRC反馈网络的高速LVDS传输优化设计[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(9): 108-113.

#### 2. 车载分布式ATS动态可配置实现策略研究

引用本文: 申飞, 崔建峰, 刘慧丰, 等. 车载分布式ATS动态可配置实现策略研究[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(11): 64-68.

#### 3. 压缩感知合成孔径雷达射频干扰抑制方法

引用本文: 孔舒亚, 叶伟, 班红艳, 等. 压缩感知合成孔径雷达射频干扰抑制方法[J]. 兵器装备工程学报, 2016, 37(2): 119-122.

#### 4. 甚低频MSK灵敏解调器的设计与实现

引用本文: 严亚龙, 董颖辉, 张静. 甚低频MSK灵敏解调器的设计与实现[J]. 兵器装备工程学报, 2015, 36(4): 111-115.

#### 5. 直升机发射控制电路监控方法设计

引用本文: 李海军, 牟俊杰, 周迎, 等. 直升机发射控制电路监控方法设计[J]. 兵器装备工程学报, 2015, 36(1): 4-7.

# 超外差结构 GPS 接收机射频前端电路仿真研究

范宇清,程二威,魏明,陈亚洲

(陆军工程大学石家庄校区 电磁环境效应国家级重点实验室,石家庄 050005)

**摘要:**设计了一种 GPS 接收机射频前端电路,采用三级混频器抑制镜像信号,并进行优化滤波。基于 ATF54143 设计了适用于接收机前端电路的低噪声放大器,采用源极串接负反馈的方法提高电路稳定性并利用 ADS 软件进行仿真。构建了基于 GPS L1 波段(1 575.24 MHz)卫星信号射频接收前端仿真平台,利用自动增益控制元件调整输出信号,实现大动态范围。对射频前端电路整体的增益、灵敏度、三阶截断点等指标进行了测试,讨论了电路三阶互调失真特性与噪声系数的关系。仿真结果表明,设计的低噪声放大器稳定性好,噪声系数低,射频前端电路具有良好的线性度与较大的动态范围,对实现多射频链路数字中频接收机大动态范围稳定接收提供了一个有效的解决方案。

**关键词:**射频前端;超外差;下变频;自增益控制

**本文引用格式:**范宇清,程二威,魏明,等.超外差结构 GPS 接收机射频前端电路仿真研究[J].兵器装备工程学报,2020,41(2):117-122.

**Citation format:**FAN Yuqing, CHENG Erwei, WEI Ming, et al. Simulation Research on GPS RF Front-End Receiving Circuit with Super-Heterodyne Structure[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering,2020,41(2):117-122.

中图分类号:TN965

文献标识码:A

文章编号:2096-2304(2020)02-0117-06

## Simulation Research on GPS RF Front-End Receiving Circuit with Super-Heterodyne Structure

FAN Yuqing, CHENG Erwei, WEI Ming, CHEN Yazhou

(National Key Laboratory of Electromagnetic Environment Effects,  
Shijiazhuang Campus of Army Engineering University, Shijiazhuang 050005, China)

**Abstract:** A GPS RF front-end receiving circuit was designed. The stage of the mixer was three and the signal of hybrid frequency was optimized through multiple filters to suppress the image signal. Based on ATF54143, a low-noise amplifier suitable for the front-end circuit of the receiver was designed. The source-series negative feedback method was used to improve the stability of the circuit and simulate with ADS. The simulation platform for the RF front-end receiving circuit based on the L1 wave band was built. And AGC was used to achieve a large dynamic range of the RF receiver front-end. The gain, sensitivity, noise figure, IP3 and other indicators of RF front-end were simulated by the software simulation tools. The noise figure of the third-order intermodulation distortion receiver of the RF front-end circuit was discussed. The simulation results show that the designed low noise amplifier has good stability and low noise figure. The RF front-end circuit has good linearity and large dynamic range, which can provide an effective solution for achieving stable reception of large dynamic range of digital IF receivers with multiple RF links.

**Key words:** RF front-end; super-heterodyne; down-conversion; automatic gain control

收稿日期:2019-03-27;修回日期:2019-04-15

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51677191);振动模式混响室内部电磁特性仿真与试验研究基金资助

作者简介:范宇清(1995—),男,硕士研究生,主要从事电磁环境模拟与防护技术研究。

通讯作者:陈亚洲(1975—),男,博士,教授,主要从事强电磁场环境模拟研究。

全球定位系统 GPS(Global Positioning System, GPS)是由 20 世纪 70 年代美国陆海空三军联合研制的新一代卫星定位系统,它以 24 颗卫星为基础,可为陆海空三大领域提供全天候、全球性的实时导航服务。GPS 接收机是用户接收 GPS 信号的主要工具,它的主要任务是接收 GPS 卫星发射的信号,以获得必要的导航和定位信息参数。因为 GPS 卫星处于 2 020 km 的椭圆形轨道上,为了降低造价和延长卫星寿命, GPS 卫星播发给用户接收机的信号十分微弱。再经大气电离层衰减,建筑物遮挡等不利环境因素,到达地面的平均强度只有  $-160$  dBw,比常见电视天线接收机功率还要低约 10 亿倍。极其微弱的信号对 GPS 接收机的设计提出了很高的要求,尤其是接收机灵敏度与动态范围需与 GPS 信号特征相适应<sup>[1]</sup>。

射频前端作为接收机的重要组成部分,主要功能是将接收到的 GPS 卫星信号经前置滤波器和放大器的滤波放大后,再与本机振荡器产生的正弦波本振信号进行混频而下变频成中频(IF)信号<sup>[2]</sup>,最后经模数(A/D)转化器将中频信号转变成离散时间数字中频信号。

本文在超外差电路结构的基础上设计了 GPS 射频前端电路,第 1 节提出了设计预期技术指标。针对 GPS 信号特点,在第 2 节中基于 ATF54143 设计了适用于接收机前端电路的低噪声放大器。第 3 节仿真测试了射频前端电路整体的灵敏度、噪声系数、动态范围,截断点等参数。通过比对系统三阶截断点与噪声系数关系,选取最优组合,减小了双音强干扰信号生成的杂散信号对电路的影响,同时兼顾了接收机噪声系数。

## 1 射频前端电路总体设计

系统主体采用“超外差”结构,总体设计如图 1 所示。由于接收机天线接收到的信号中除有用信号外还包括环境噪声信号,首先将 GPS 信号与环境噪声信号同时经过前置滤波器滤除带外干扰信号;后经前置低噪声放大器进行放大,该放大器须具有高增益和较小的噪声,它关系到整个系统的噪声系数<sup>[3]</sup>。将低噪声放大器输出的信号送入三级混频器,第一级混频将接收到的 GPS 卫星信号从射频 L1 下变频到 175.42 MHz,再通过随后的两集混频将信号进一步下变频到 35.42 MHz 和 4.309 MHz,三级混频器的本振依次为锁相环提供 1 400 MHz,140 MHz 和 31.111 MHz 的振荡信号。锁相环参考时钟为本地 10.23 MHz 晶振信号,与卫星时钟基准频率一致。

射频前端设计目的是为了信号能够顺利进入后续处理电路。由于热噪声和干扰噪声的有效电平在模数转换器(ADC)输入端应稳定维持为常数,因此有必要在 ADC 之前加装自增益控制元件(AGC)<sup>[4]</sup>。当射频干扰发生时,AGC 就会快速降低增益,使 ADC 输入端维持在最初的有效电平上,避免了干扰对后续电路的影响。同时保证在不影响调谐器模块总增益的情况下,实现二次增益调节。

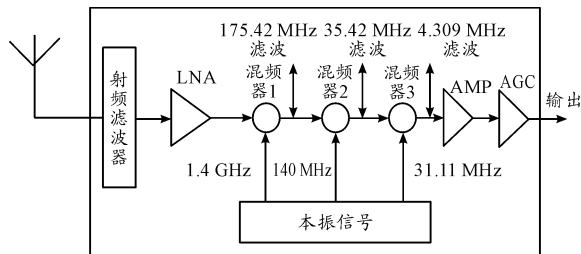


图 1 射频前端系统总体设计框图

GPS 射频前端电路主要存在 3 种典型的拓扑结构,分别为零中频结构、低中频结构和超外差结构。零中频结构元件少、功耗低、抑制镜像信号干扰能力强,但其本振信号会泄露到射频信号入口,从而使输出产生直流分量,掩盖混频输出信号,导致后续电路无法工作;低中频结构将信号下变频到较低中频处而非基带,使直流失调得到了有效控制,但它抑制镜像信号的能力有限,不适用于 GPS 接收机;超外差结构有效解决了原来高频放大式接收机输出信号弱、稳定性差的问题,使输出信号具有较高的选择性和较好的频率特性,同时,采用多级超外差式结构和外接的高 Q 值与大阶数滤波器可有效抑制镜像信号,同时抑制了相邻信道的干扰<sup>[5]</sup>。

综上所述,超外差式结构虽然电路复杂,但无直流失调问题且镜像抑制能力强,可以通过选择合适的滤波器来获得精确的选择性与更高的灵敏度。综合三种接收机优缺点,超外差式结构稳定性与可靠度明显优于其他两种。故本接收机射频前端电路采用超外差结构。

GPS 接收机射频前端电路主要技术指标包括灵敏度、系统系数、工作频段、中频输出功率、中频输出频率、动态范围等。射频前端技术指标的选择对整个接收机性能至关重要,将直接影响到后续信号处理。接收机射频前端电路设计指标见表 1。

表 1 射频前端电路主要指标

|            |               |
|------------|---------------|
| 工作频段/MHz   | 1 500 ~ 1 600 |
| 灵敏度/dBm    | > -133        |
| 噪声系数/dB    | 6.5           |
| 动态范围/dB    | 130           |
| 无杂散动态范围/dB | 100           |
| 中频输出频率/MHz | 4.309         |
| 中频输出功率/dBm | 0             |

## 2 低噪声放大器设计

低噪声放大器是射频前端电路中的关键部件,主要实现对输入小信号的放大,同时避免引入额外噪声。本节采用源极串接负反馈的方法,设计了一种适用于 GPS 接收机射频前端的低噪声放大器。放大器使用 Avago 公司生产的 ATF54143 晶体管为主要器件,根据直流工作点设计了相应

的偏置电路。通过仿真分析确定了负反馈的电感值,使放大器具有较高的稳定性与较低的噪声系数,保证了射频前端整体的可靠性。设计的低噪放总体参数如表 2 所示。

表 2 低噪声放大器总体参数

|                  |          |
|------------------|----------|
| 中心频率/MHz         | 1 575.42 |
| 增益/dBm           | 17.45    |
| 输入端 $S_{11}$ /dB | -14.139  |
| 输出端 $S_{22}$ /dB | -11.826  |
| 带宽/MHz           | 100      |
| 噪声系数/dB          | 0.393    |

### 1) 偏置电路设计

在 ADS 中添加直流源对晶体管进行直流工作点扫描,得到晶体管  $U_{dd} = 5 \text{ V}$ ,  $U_{ds} = 3 \text{ V}$ ,  $I_{ds} = 40 \text{ mA}$ ,根据直流工作点设计其偏置电路,如图 2 所示。偏置电流  $I_D$  设计为  $40 \text{ mA}$ ,偏置电阻  $R_1 = 334 \ \Omega$ ,  $R_2 = 39 \ \Omega$ 。

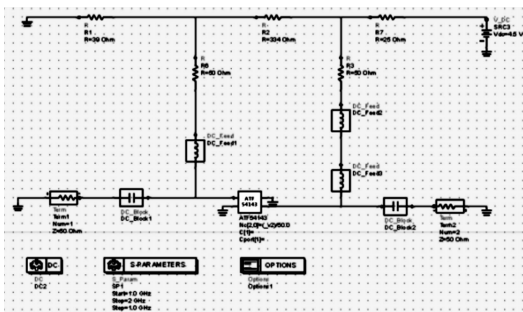


图 2 低噪声放大器偏置电路设计线路图

### 2) 稳定性分析

当稳定性判别系数  $K > 1$  时,晶体管处于稳定状态。对放大器进行最大增益与稳定性判别系数仿真。未加负反馈情况下,在  $1.57 \text{ GHz}$  时,  $K < 1$ ,晶体管处于不稳定状态。对电路进行优化,在源极串接负反馈电感,并在电源部分添加扼流电感与旁路电容阻隔射频信号,电感和电容选用 Murata 公司生产的 LQG 系列电感与 GRM 系列电容。调节负反馈电感值,使电路达到最佳稳定状态,此时负反馈电感值为  $0.37 \text{ nH}$ 。图 3、图 4 是晶体管最大增益与稳定性系数  $K$  随频率变化曲线。由图 3 可知,此时晶体管最大增益为  $17.45 \text{ dB}$ 。由图 4 可知,电路优化后,在  $1.56 \text{ GHz}$  时,  $K > 1$ ,晶体管稳定。在实际电路中,反馈型电感通常使用微带线等效,便于制作与焊接。

### 3) 噪声系数分析与输入匹配

对放大器的最小噪声系数进行仿真,同时使晶体管输入端满足最佳源反射系数要求。通过 Smith 圆图完成输入阻抗匹配,调节微带线长度,补偿由于隔直电容造成的噪声最优化点偏移,在直流电源处加入滤波电容,对电路进一步优化,得到最小噪声系数与输入反射系数,如图 5、图 6 所示。当频

率为  $1.56 \text{ GHz}$  时,最小噪声系数为  $0.393 \text{ dB}$ ,输入端  $S_{11}$  为  $-14.309 \text{ dB}$ 。

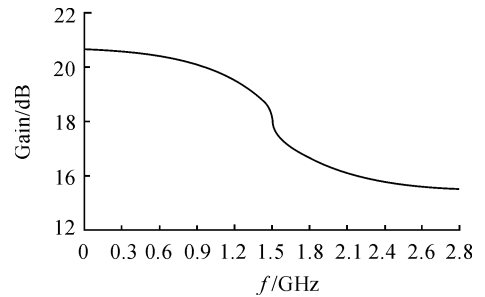


图 3 晶体管最大增益随频率变化曲线

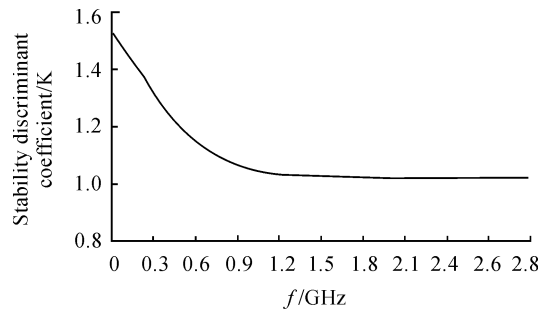


图 4 晶体管稳定性判别系数随频率变化曲线

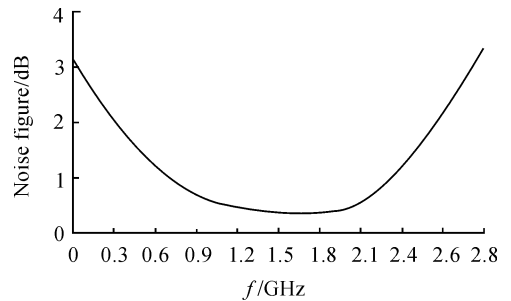


图 5 放大器最小噪声系数仿真曲线

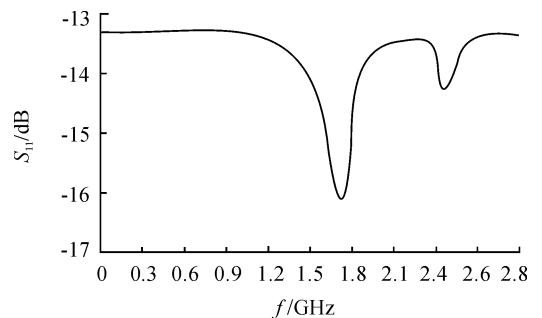


图 6 放大器输入端  $S_{11}$  仿真曲线

## 3 射频前端系统行为级仿真与分析

根据总体设计框图,利用 ADS 软件搭建的系统仿真如图 7 所示。

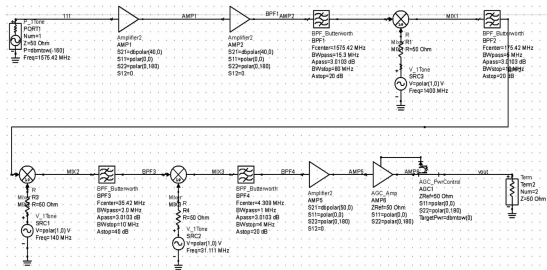


图7 接收机射频前端电路 ADS 仿真示意图

### 3.1 频带选择性仿真与系统链路预算分析

对接收机进行频带选择性仿真,结果如图8所示。由图8(a)可知,接收机在滤波器中心频率处增益为39.53 dB。在偏离中心频率230 MHz处约有57 dB左右的衰减。由图8(b)可知,射频前端电路通带内波动不超过0.3 dB,系统稳定性良好。

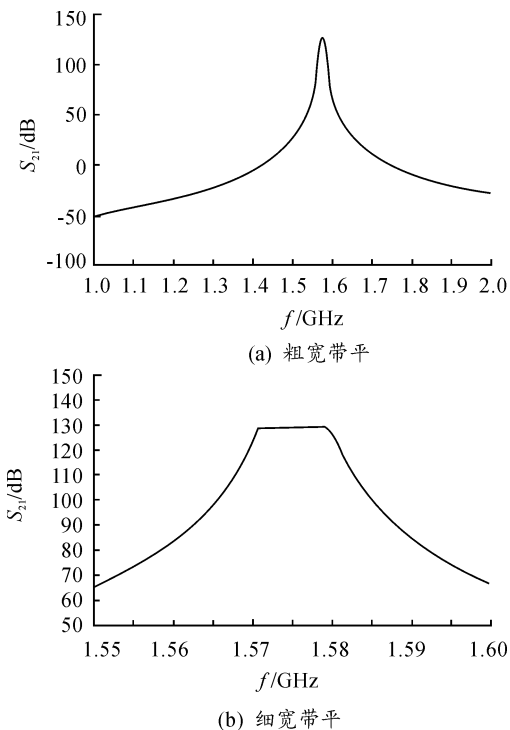


图8 粗细宽带下仿真结果

在交流分析中,对接收机进行系统预算增益仿真,输入信号功率设置为-130 dBm,结果如图9所示。图9显示了系统总体增益在电路各个模块中的分配情况。由图9可知系统总体增益为130 dB。输出中频信号经接收端AGC元件处理后,功率接近0 dBm,这说明系统具有良好的稳定性。

### 3.2 系统噪声系数与灵敏度分析

对于多个二端口网络级联成的系统,系统的总噪声系数可以表示为:

$$F_{\text{cas}} = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_{A1}} + \dots + \frac{F_n - 1}{G_{A1} G_{A2} \dots G_{An-1}} \quad (1)$$

式(1)中:  $F_n$  为第  $n$  级的噪声系数;  $G_{An}$  为第  $n$  级的增益。

由此可以判断,系统第一级增益和噪声系数对整个系统的噪声系数影响较大,这是因为后一级的噪声系数被前一级的增益削弱而减小了。因此,减小总噪声系数的关键在于减小第一级的噪声或增加第一级的增益。在第2节中,设计的低噪声放大器可有效降低系统噪声系数。

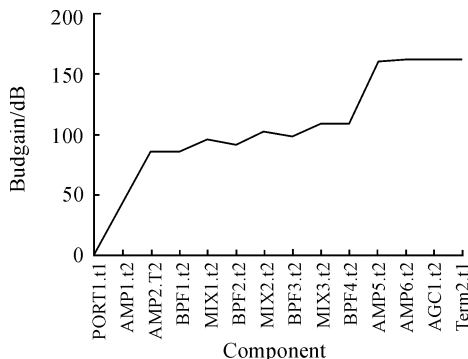


图9 系统链路预算仿真结果

对系统进行噪声系数分析,仿真结果见图10。由图10可知系统噪声系数随输入功率在6.5~7 dB之间波动。当输入功率达到-130 dBm(GPS信号到达地面的平均强度)时,噪声系数为6.5 dB。

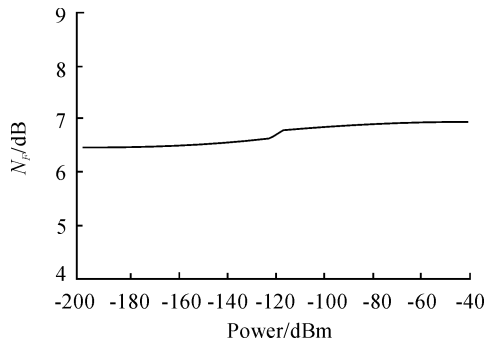


图10 系统噪声系数仿真结果

接收机灵敏度可用公式表示为:

$$S = -174 \text{ dBm} + 10 \lg B_w + N_f + \frac{E_b}{N_0} \quad (2)$$

式(2)中:  $B_w$  为接收机带宽,取1 kHz;噪声系数  $N_f$  由图6取6.5 dB;  $SNR = \frac{E_b}{N_0} = 5 \text{ dB}$ 。计算可得系统灵敏度为-132.5 dBm,符合系统设计指标。

### 3.3 动态范围与1 dB压缩点

#### 3.3.1 线性动态范围与1 dB压缩点

当信号在系统中功率由理想状态下降为1 dB时,即为1 dB压缩点( $P_{1 \text{ dB}}$ ),压缩点越高意味着输出功率越高。输入一个可变功率来测试射频前端电路的1 dB压缩点,仿真结果如图11所示,由  $m2$  点可知系统的  $P_{1 \text{ dB}}$  为1.215 dBm。

接收机动态范围(DR)是指接收机能够对接收信号进行检测而又使信号不产生失真的输入信号大小范围,它与1 dB压缩点的关系是<sup>[8]</sup>:

$$DR = P = P_{1\text{dB}} - S \quad (3)$$

式(3)中, $S$ 为接收机灵敏度,由本文3.2节取 $-132.5$  dBm。由此可以计算出该系统的动态范围 $DR = 133.715$  dBm,满足设计指标要求。

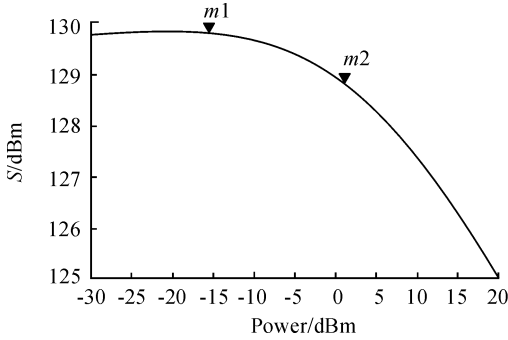


图 11 射频前端电路 1 dB 压缩点仿真结果

### 3.3.2 无杂散动态范围

无杂散动态范围(SFDR)指两个等幅双音信号输入时,接收机从最小可检测输入信号(MDS)到还未产生三阶互调响应处之间的动态范围。SFDR描述了当GPS信号中存在大的干扰信号情况下,对功率较低的有用信号的处理能力。最小可检测信号(MDS)决定了SFDR的下限功率 $P_L$ ,其定义为:

$$P_L = MDS = -171 \text{ dBm} + N_F + 10\lg B_W \quad (4)$$

上限功率 $P_m$ 的界定方法为:当最小可检测信号MDS的功率等于输入端所加两个信号在输出端产生的三阶互调量的功率时,输入端的等幅双音信号的功率值就是无杂散动态范围的上限,最小可检测信号的另一种定义方式为:

$$MDS = 3(P_m) - 2(IP_3) \quad (5)$$

上限率 $P_m$ 与下限功率 $P_L$ 之差记为SFDR,根据式(4)和式(5)求得:

$$SFDR = P_m - P_L = \frac{2}{3}(IP_3 - N_F - 10\lg B_W + 171) \quad (6)$$

式(6)中, $B_W$ 为接收机带宽,取1 kHz。代入参数值,算出SFDR为100.8 dB,可见系统在较大干扰的情况下仍具有对有用信号较强的处理能力。

### 3.4 三阶截断点优化设计

当两个一定频率的强干扰信号进入接收机的输入端后,这两个信号因有源器件的零线性作用会产生混频,生成杂散信号,被称为互调产物。当互调产物落入通频带内,则会形成干扰信号产生非线性失真。

一般情况下,二阶和三阶互调失真影响较大。二阶互调产物一般选用带通滤波器构成的射频前端预选器滤除<sup>[9]</sup>,三阶互调可以通过减小滤波器带宽来降低对接收机的影响,但在射频前端采用的预选滤波器的相对带宽下限一般为20%,实现带宽很窄的射频滤波器非常困难<sup>[10]</sup>。在GPS接收机中,通常用三阶截断点作为衡量系统线性度与失真的重要指标。

在接收机射频前端输入两个等幅双音信号,频率分别为

1 575.42 MHz和1 227.6 MHz,对应GPS信号的两个频段。图12中,功率单位取对数,曲线a与b分别为弱非线性系统付氏频率响应的基波分量和三次分量,将两条曲线线性部分延长,交点即为三阶截断点,读出交点处输入功率为16.754 dB,即为系统等幅双音信号互调输入的三阶截断点。

三阶截断点越高,则带内强信号互调产生的杂散响应对系统的影响就越小<sup>[11]</sup>。由仿真结果发现,随着交调点的升高,系统的噪声系数也会随之升高。通过调节频带内电路低噪声放大器的增益与噪声系数,得出三阶截断点与系统噪声系数的关系,如图13所示。当噪声系数为6.5 dB时系统三阶截断点约为16.5 dB,电路设计过程中,在选取合适的噪声系数后还需判定三阶截断点是否在系统可承受的范围内。一般可采取折中的方法以兼顾接收机的噪声系数和三阶截断点。使整个系统既有较低的噪声系数,又有良好的抗干扰能力。

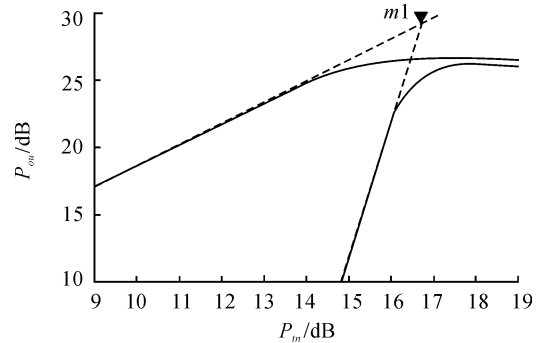


图 12 三阶互调失真特性测试曲线

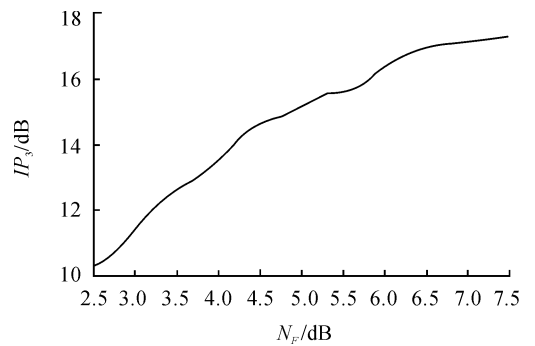


图 13 三阶截断点与系统噪声系数关系曲线

## 4 结论

1) 在超外差电路结构的基础上设计了GPS射频前端电路,仿真结果显示电路线性度好、灵敏度高、动态范围大,适合于接收到达地面的低功率GPS信号。

2) 源极串接负反馈的方法可有效提高低噪声放大器晶体管的稳定性,实际电路设计中常用微带线代替负反馈电感,通过调节微带线长度优化放大器噪声系数。低噪声放大器的设计对射频前端电路整体性能至关重要。

3) 考虑射频前端电路三阶互调失真时要兼顾接收机噪

声系数,可由三阶互调失真特性仿真曲线调节电路参数,生成与噪声系数的最优组合。避免接收机因互调产物的减少而带来较大的噪声系数。在以后设计该类电路中值得关注。

## 参考文献:

- [1] 边少锋,李文魁. 卫星导航系统概论[M]. 北京:电子工业出版社,2005:8-20.
- [2] 李杨. GPS 射频前端设计及 GPS 信号捕获方法研究[D]. 西安:西安理工大学,2008.
- [3] 吴治霖. 一种超宽带低噪声放大器的仿真设计[J]. 通信技术,2018,51(6):1481-1486.
- [4] 李柏渝,唐小妹,聂俊伟,等. 卫星导航抗干扰接收机 AGC 电路模型分析与优化设计方法[J]. 国防科技大学学报,2017,39(06):25-30.
- [5] WANG G Q, WEI X Z, LU H Z. Double-IF quadrature demodulation of super-heterodyne radar receiver[C]//Proc. of Signal Processing, 2008. ICSP 2008. 9th International Conference on, 2008:2505-2508.
- [6] LENG X, YANG J H, SONG H F. High Saturation Level of

the AGC Circuit Implementation [C]//Proc. of Computer Science and Electronics Engineering (ICCSEE), 2012 International Conference on, 2012:262-265.

- [7] 赵潇腾,尹军舰,李仲茂,等. 一种混合式高动态范围自动增益控制电路[J]. 电子设计工程,2018,26(4):167-171.
- [8] GUPTA N, CHAUJAR R. Influence of gate metal engineering on small-signal and noise behaviour of silicon nanowire MOSFET for low-noise amplifiers[J]. Applied Physics A, 2016,122(8):717.
- [9] 谭庆艳,庄剑. 无线通信系统中三阶交调的研究[J]. 电子技术,2014,43(12):20-21.
- [10] 张信民,董娜,肖力. 宽带数字接收机性能指标的研究[J]. 雷达与对抗,2018,38(2):19-22.
- [11] YU Z Z, ZHOU J, RAMIREZ M, et al. The impact of ADC-nonlinearity in a mixed-signal compressive sensing system for frequency-domain sparse signals[J]. Physical Communication, 2012,5(2):196-207.

(责任编辑 杨梅梅)

(上接第 71 页)

## 参考文献:

- [1] 高树兹,陈运生,张月林,等. 火炮反后坐装置设计[M]. 北京:兵器工业出版社,1995.
- [2] 范永,刘树华,曹广群. 基于动网格的某驻退机三维流场数值模拟与分析[J]. 火炮发射与控制学报,2010(4):63-65.
- [3] 张晓东,张培林,傅建平,等.  $k-\varepsilon$  双方程湍流模型对制退机内流场计算的适用性分析[J]. 爆炸与冲击,2011,31(5):516-520.
- [4] 潘孝斌,宋彦明,谈乐斌. 筒壁沟槽式制退机主流液压阻力系数分析[J]. 振动与冲击,2016,35(17):146-150.
- [5] WREN G P, RAY S E. Simulation of flow problems with moving mechanical components, fluid-structure interactions and two-fluid interactions and two-fluid interfaces[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 1997

(24):1443-1448.

- [6] 朱锐,郭保全,于斌. 火炮制退机流场分析及节制环磨损机理研究[J]. 火炮发射与控制学报,2015,36(2):12-15.
- [7] 谢立峰,郑建国,陈传君,等. 考虑空化效应的制退机流场数值模拟[J]. 机械制造与自动化,2014,43(6):129-132.
- [8] 狄长春,顾赵强. 基于空化效应的某驻退机液压阻力仿真研究[J]. 润滑与密封,2016(2):114-117.
- [9] 黄景峰,董楠,刘圣杰. 基于 Simulink 的液压缓冲器动态特性分析[J]. 机床与液压,2015,43(13):145-148.
- [10] 郝保臣,孙卫国,潘孝斌. 某火炮液压缓冲器缓冲特性研究[J]. 兵器装备工程学报,2018,39(9):54-58.
- [11] 马星国,鲁江,尤小梅,等. 渐变式液压缓冲器的设计与仿真研究[J]. 机床与液压,2016,44(13):148-153

(责任编辑 周江川)