

高动态 GPS 信号模拟器信号强度问题研究

常 青^① 张伯川^② 陈向东^③ 张其善^①

^①(北京航空航天大学电子信息工程学院 北京 100083)

^②(北京航天自动控制研究所 北京 100854)

^③(北京市 5136 信箱 北京 100094)

摘 要: 高动态 GPS 卫星信号模拟器可以根据载体的动态环境, 精确产生载体收到的 GPS 卫星信号。GPS 卫星信号模拟器有多种技术要求, 其中, 模拟器输出信号的强度是研制模拟器所必须解决的一项关键技术。该文通过对 GPS 信号解调解扩后信噪比分析, 导出了模拟器模拟的 GPS 卫星信号的强度如何客观地反映真实情况。实验结果证明了所提方法的有效性。

关键词: GPS; 高动态信号模拟器; 信号控制

中图分类号: TN850.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)04-0998-04

Study on the Signal Intensity of High Dynamic GPS Signal Simulator

Chang Qing^① Zhang Bo-chuan^② Chen Xiang-dong^③ Zhang Qi-shan^①

^①(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

^②(Beijing Aerospace Automatic Control Institute, Beijing 100854, China)

^③(P. O. Box 5136, Beijing 100094, China)

Abstract: According to receiver's dynamic environment, high dynamic GPS signal simulator can precisely generate GPS signal that the receiver get. GPS signal simulator has many technology request, the intensity of the signal is a key technology in the high dynamic GPS receiver's research and development. After the GPS signal is demodulated, the Signal Noise Ratio(SNR) of the receiver is analyzed in this paper. On the basis of above, the paper also derives how the signal generated by GPS Signal Simulator reflects truly the GPS signal and outside noise. Experimentation result proves the effectiveness of the method mentioned above.

Key words: GPS; High dynamic signal simulator; Signal controlling

1 引言

实现高稳定度、高分辨率和多特性的多通道 GPS 信号发生器是各类基于 GPS 技术制导导弹研制的关键所在, 对卫星导航系统有着非常重要的现实意义。接收机安装在载体上, 它接收的 GPS 卫星信号会反映载体动态引起的多普勒频移, 同时信号经过空间传播, 不可避免地受到各种误差源的影响, 信号在接收时刻的状态已不同于发射时刻状态, 这种差别与载体位置、动态特性、测量时间、应用环境等有关。作为研制卫星定位系统的技术基础, 必须建立高动态运动载体影响卫星信号、星历变化、电离层效应、对流层效应、卫星信号的多普勒频移变化的相关理论模型, 而 GPS 信号在接收时的信号强度模型的建立则是研制模拟器的关键技术。在研制过程中, 本文根据接收机的接收信号信噪比情况对模拟器的信号强度进行了分析并很好地解决了这个问题。该模拟器已与接收机进行了联调, 试验结果表明模拟器产生的

信号较好地反映了 GPS 卫星信号的各种特性^[1,2]。

2 接收机信号信噪比分析

对于积分时间为 1ms 的接收机, GPS 信号解调解扩后信噪比最高可达 20dB 左右, 对于高度角不同的 GPS 星解调解扩后信噪比差异可达 15-16dB。模拟器模拟的 GPS 信号必须能够反映这一情况并建立相应的信号强度模型。

2.1 GPS 接收机天线前端信号强度分析

GPS 信号传输的路径损耗与信号的传播路径长度有关, 卫星仰角高, 传播路径短, 约为 20000km; 卫星仰角低, 传播路径长, 在 0° 时, 约为 25300km。因此, 卫星仰角越小, 信号传播的自由空间损耗 δ 越大。

信号传播路径长度约为

$$l = [(r+h)\cos v - r] / \sin \theta \quad (1)$$

其中 $r+h$ 为卫星与地心的连线长度, r 为地球半径, $h = 20000\text{km}$, θ 为 GPS 卫星相对接收机的高度角, v 为地心-接收机的连线与地心-GPS 星连线的夹角。

信号在传播过程中的自由空间损失 δ 为

$$\delta = 10 \lg \left(\frac{\lambda}{4\pi l} \right)^2 \quad (2)$$

其中 λ 为 GPS 信号载波波长, 当信号载波频率为 1575.42MHz 时, λ 为 0.19m。

当 l 为 20000km 时, $\delta = -182.43\text{dB}$; 当 l 为 25300km 时, $\delta = -184.47\text{dB}$, 差别可达 2.03dB。

在 GPS 卫星高度上, 地球所张的角大约为 27.74° , 卫星天线方向图范围是 42.6° (见图 1)。同时, 由于卫星发射天线阵的赋型波束在到达地球时与地球边缘形状相匹配, 即卫星对于处于卫星 S 与地心 O 连线并在地面上 B 点的接收机, 其卫星发射天线增益最小; 卫星对于处于卫星 S 与地球切线并在地面上 A 点的接收机, 其卫星发射天线增益较 B 点增加 $2\text{dB}^{[1]}$ 。这是由于在 SO 联线上信号在传播过程中的自由空间损失最少; 在 SA 联线上信号在传播过程中的自由空间损失最大。GPS 信号相对于地球主波束图如图 1 所示。

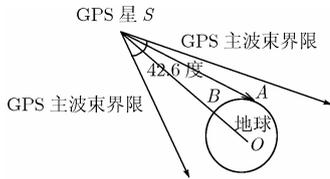


图 1 GPS 星主波束图

按照 GPS 系统的要求, 接收机天线处的信号功率为 -130dBm 到 -127dBm 左右, 带宽为 2.046MHz; 对于 Block II 卫星, 由于卫星功率设计时考虑到功率随时间衰减, 卫星使用初的实际功率比设计值要高一些, 根据我们实验的结果, 现在的实际功率要比设计值要高 6dB 左右, 为 -124dBm 到 -121dBm 左右。同时, 在带宽为 2MHz 内噪声功率为 -111dBm , 所以 GPS 信号实际上是深埋在噪声之中的。

2.2 接收机解调解扩后信号强度分析

接收机相关接收后可输出信噪比 $C/N_0^{[3-5]}$ 为

$$C/N_0 = S_0 + G(\alpha, \beta) + k - N_f - L \quad (3)$$

式中, S_0 为接收机接收到的 GPS 卫星信号的信噪比; $G(\alpha, \beta)$ 为天线增益; k 为解扩增益, 由信号解扩时的积分时间决定, 当积分时间为 1ms 时, $k = 30$; N_f 为接收机噪声系数, 包括天线和电缆的损耗, 单位 dB; L 为 AD 变换及其它附加损耗, 与接收机设计有关, 单位 dB。

当 GPS 信号功率最大值为噪声下 10dB 左右时, $S_0 = -10\text{dB}$ (GPS 信号为 -121dBm , 噪声功率为 -111dBm)。在本文的 GPS 接收机中, 选用 GEC 公司的十二通道相关器 GP2021 和 GP2010 射频前端, GP2010 经过三次下变频并经 AGC 自动增益控制后得到的 4.309MHz 模拟信号为噪声信号, 电平为 $100\text{mV}_{\text{rms}}$ (rms 为均方值), 在 50Ω 的负载下功率为 -7dBm , 此时, 信号功率为 $-17 + G(\alpha, \beta) - N_f \text{dBm}$ 。

接收机扩频增益为 30dB, 相关后信噪比: $S_0 + k = -10$

$+30 = 20(\text{dB})$ 。

考虑天线对 GPS 信号的最大增益, 本文的接收机采用的天线最大增益为 6dB, 则相关后信噪比: $20 + 6 = 26(\text{dB})$ 。

天线增益与卫星仰角、载体姿态有关, 根据天线的方向性图可知在高度角较小的情况下, 天线的增益小。

本文的接收机的噪声系数 N_f 约为 2.5dB, 与接收机设计有关的插入损耗 L 约为 2dB, 信号解调解扩后最大信噪比降为 21.5dB。

需要说明的是为降低带外信号对接收信号的影响, 在射频前端需加入无源介质射频滤波器, 这样会带来几 dB 的插入损耗, 这个插入损耗可靠 LAN (低噪放大器) 和 GP2010 芯片中的 AGC 电路来补偿, 且该滤波器不会对整个系统的噪声水平产生影响。

天线对不同角度信号的增益差别可达 11dB, 再加上 GPS 卫星天线对地球不同点发射信号时 3dB 的功率增益差别, 接收机最大信噪比差别可达 14dB, 如考虑信号传播路径损耗差别, 最大信噪比差别可更大。

实测的相关后最大信噪比为 21dB, 最小为 6dB。表 1 为 2003 年 12 月 27 日 16 时 24 分由接收机测得的不同卫星在不同高度角下信号解调解扩后的信噪比。

表 1 解调解扩后信噪比

星号	4	7	8	9	10	11
信噪比(dB)	13.8	19.7	6	7.1	11.1	9.7
高度角(°)	32	64	6	10	29	24

试验表明, GPS 卫星相对接收机在高度角 50° 到 65° 之间, 接收机信噪比最大, 该角度范围及所测得的最大信噪比值与接收机所使用的天线的性能和方向性图有着直接的对应关系。

3 卫星信号模拟器信号强度分析

3.1 模拟器硬件工作流程

计算机实时将计算出的参数通过 PCI 接口控制芯片送入板卡上的缓冲区(双口 RAM)中, DSP (数字信号处理芯片) 将这些参数从缓存区中读出并送往 FPGA (大规模在线可编程器件), FPGA 根据计算机计算出的当前可观测到的卫星序号 i 和预先编制好的第 i 颗卫星的星历数据 D 码, 与同时产生的第 i 颗卫星的地址码异或进行扩频。然后根据信号传播延迟时间 τ_i 对扩频码进行延时, 再进行数字载波调制, 并将 12 个通道调制后的数字信号进行合成, 进行内插后送入 D/A 转换成模拟信号, 用 Dynex DW9255 声表面波滤波器滤波后得到 12 颗卫星的 35.42MHz 的合成中频模拟信号, 最后经过上变频, 滤波及信号增益和噪声控制后得到载频为 1575.42MHz 的射频信号^[6]。模拟器信号产生流程如图 2 所示。

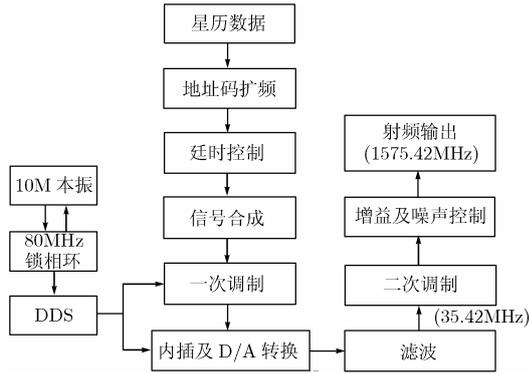


图 2 模拟器功能模块

3.2 模拟器信号强度

根据同一颗星在不同时刻相关后的信噪比减去相应高度角对应的天线增益 $G(\alpha, \beta)$ 和解扩增益 30dB, 加上 N_f 和 L , 即可得出信号到达接收机前端的信噪比 S_0 :

$$S_0 = C/N_0 - G(\alpha, \beta) - 30 + N_f + L = C/N_0 - G(\alpha, \beta) - M \tag{4}$$

$$M = 30 - N_f - L = 25.5(\text{dB})$$

以噪声强度 -111dBm 为基础, 可算出信号到达接收机前端的信号强度。

$$S_r = -111 + S_0 \tag{5}$$

模拟器产生的射频信号可通过同轴电缆不经过接收机天线和低噪放大器直接接入接收机的信号输入端。因此, 模拟器产生的信号必须考虑接收机的天线对 GPS 信号的增益和低噪放大器增益对噪声和信号的放大作用及低噪放大器的噪声系数, 噪声强度为 -111dBm + $\beta + \eta$, β 为低噪放大器增益(LAN gain), η 为低噪放大器的噪声系数, 则此时的信号强度为

$$S'_r = S_r + \beta + G(\alpha, \beta) \tag{6}$$

当测出一系列不同高度角下的 S_r 和 S'_r 后, 可用插值的办法来确定未经测定的高度角下的 S_r 和 S'_r 。

3.3 模拟器信号强度分析

如在与 GP2010 相匹配的声表面波滤波器 DW9255SAW 前接入模拟器信号, 其信号强度 x 必须符合下式, GP2010 方可正常工作。

$$-7\text{dBm} = 75\text{dB} - 17\text{dB} + x_1 \quad x_1 = -65\text{dBm} \tag{7}$$

$$-7\text{dBm} = 15\text{dB} - 17\text{dB} + x_2 \quad x_2 = -5\text{dBm} \tag{8}$$

$$x_1 \leq x \leq x_2$$

其中 AGC 自动增益控制范围为 15-75dB, DW9255SAW 的插入损耗为 17dB。

接收机在正常工作环境下, 由 GP2010 和 GP2021 的电气特性可知 I、Q 通道噪声功率可表示为: $I^2 = Q^2 = 48571$ 。因此无信号时噪声功率为 $H = I^2 + Q^2 = 97142$ (AGC 自动增益控制会自动调节采样量化的电平阈值, 使采样后 ± 1 分布概率是 70%, ± 3 分布概率是 30%, 于是噪声功率可表示为 97142)。

接收机设定捕获信号时信噪比为 $S/N_0 = 6\text{dB}$, 较实测的最大信噪比 19dB 小 13dB, $S/N_0 = 6\text{dB}$ 保证了接收机 0.06S 的虚警概率。

由数字中频信号的码和接收机复现的 C/A 码的相位差 τ (单位 chips)引起的相关能量损失为 $20 \log(1 - \tau)$ (dB)。由数字中频信号的载波频率和载波 NCO 输出频率之差 Δf_d 引起的相关能量损失为 $20 \log(\sin(\pi \Delta f_d T) / (\pi \Delta f_d T))$ (dB)。在信号的二维搜索过程中, 码搜索时的步长增量为 1/2 基码, 频率域的步长增量为 500Hz。所以由码相位差 $\tau = 0.5\text{chips}/2 = 0.25\text{chips}$ 和频率之差 $\Delta f_d = 500\text{Hz}/2$ 带来的相关能量损失分别为 2.5dB 和 0.9dB。考虑搜索过程中码相位差和频率之差带来的能量损失, 捕获门限为:

$$V_{\text{code}} = 97142 \times 10^{\frac{6-3.4}{10.0}} = 176769 \tag{9}$$

式中 97142 为噪声基底。载波锁定门限为(信噪比 SNR = 8dB)

$$V_{\text{carr}} = 97142 \times 10^{\frac{8}{10.0}} = 612924 \tag{10}$$

如模拟器信号衰减不够, 会发生门限设置失效, 信号捕获环路发生对非目标 GPS 星的信号假锁现象。当 GPS 信号为噪声下 10dB 且接收机相关积分时间为 1ms 时, 接收机解调解扩后的最大信噪比水平为 19dB。由于不同 GPS 星地址码的互相关相对自相关来说可以差到 21dB, 则对于其他非目标 GPS 星信号解调解扩后的信噪比就有可能为 -2dB; 当模拟器信号只衰减至噪声下 5dB, 对于其他非目标 GPS 星的解调解扩后的信噪比就有可能为 3dB, 由式(9)可知, 接收机可能会发生码捕获环路对非目标 GPS 星的信号假锁的现象。同时, 当模拟器信号衰减至噪声下 21dB 时, 接收机解调解扩后的最大信噪比水平为 8dB, 由式(10)可知, 在此信噪比下, 接收机勉强可以达到载波锁定, 如模拟器信号衰减更大, 接收机不能锁定和跟踪 GPS 信号。

由此, 可以得到这样的结论: 模拟器信号输出强度可以在一定范围内变化, 模拟器信号输出强度对外界噪声而言, 常用值应在 -6dB 到 -21dB 之间, 试验表明在 -8dB 到 -19dB 之间较好。当然, 为考核接收机的接收灵敏度指标, 信号输出强度可以在 -19dB 以下。

以上这些现象在接收机与模拟器的联调过程中已得到验证。

4 结束语

信号的各项波形参量的确定是研制模拟器的难点问题, 其中强度问题的解决必须考虑接收机的工作状态并在整个 GPS 系统中加以讨论。同时, 这个问题的深入研究还为解决模拟器和接收机之间的电磁兼容问题提供了理论指导。对模拟器的研制而言, 这就使该问题的研究具有更进一步的意义。

参 考 文 献

- [1] 赵军祥. 高动态智能 GPS 卫星信号模拟器软件数学模型研究. [博士学位论文], 北京航空航天大学电子工程系, 2003.
- [2] 张伯川, 张其善. 高动态接收机的温启动快捕问题研究. 电子学报, 2005, 33(3): 530-533.
Zhang Bo-chuan and Zhang Qi-shan. A satellites signals quick acquisition algorithm for the high dynamic GPS receivers in warm start. *Acta Electronica Sinica*, 2005, 33(3): 530-533.
- [3] 邱致和王万义(译). GPS 原理与应用. 北京: 电子工业出版社, 2001: 73-74.
- [4] 罗兴宇. 基于 DSP 技术的高动态 GPS 接收机的研制. [硕士学位论文], 北京: 北京航空航天大学, 2002.
- [5] 孙礼. GPS 接收机系统的研究. [博士学位论文], 北京航空航天大学电子工程系, 1998.
- [6] 陆娟. 高动态 GPS 信号模拟器的研制. [硕士学位论文], 北京航空航天大学电子工程系, 2003.
- 常 青: 男, 1962 年生, 副教授, 主要研究方向为信息传输与处理、卫星导航、信号处理、扩频通信.
- 张伯川: 男, 1972 年生, 博士, 主要研究方向为卫星导航 GPS、扩频通信.
- 陈向东: 男, 1970 年生, 博士, 主要研究方向为卫星导航 GPS、扩频通信.
- 张其善: 男, 1936 年生, 教授, 博士生导师, 国家级有突出贡献的科技专家, 中国电子学会会士, 美国 IEEE 高级会员, 主要研究方向为卫星导航 GPS、扩频通信.