

基于人工神经网络的 GPS 卫星信号模拟器信号估计方法¹

寇艳红 杨东凯 常青 张其善
(北京航空航天大学电子信息工程学院 北京 100083)

摘 要 多通道全球定位系统 (GPS) 卫星信号模拟器用来为 GPS 接收机和导航系统提供逼真的测试信号。该文从模拟器设计的角度对到达 GPS 接收机天线的卫星信号进行了分析,着重讨论了因众多误差因素影响而不易直接利用经验模型确定的几个波形参量的估计问题。基于人工神经网络 (ANN) 理论,提出一种利用 ANN 来模拟信号传播延迟、载波相位、信号功率等参量的方法,给出了基于 ANN 的模拟器闭环测试系统的结构,并对所设计的 ANN 进行了训练和验证。仿真实验结果表明,所设计的 ANN 能够在统计意义上逼真地模拟样本数据,从而使基于 ANN 的模拟器信号状态参量计算能够满足设计要求,可以直接应用于多通道 GPS 信号模拟器的研制。

关键词 人工神经网络, GPS, 模拟器, 信号估计, 伪距误差
中图分类号 TN911.23, TN-052

1 引言

全球定位系统 (GPS) 卫星信号模拟器通过模拟各种真实环境中 GPS 用户端设备接收的卫星导航信号,为 GPS 接收机尤其是高动态 GPS 接收机的研制开发提供一个仿真、调试和测试的平台,是 GPS 系统实验研究、GPS 接收机功能和性能检验的重要技术手段^[1-3]。

高精度、具有实时闭环测试能力的 GPS 信号模拟器的研制涉及到多项关键技术,包括模拟器整体结构的设计,目标动态特性的模拟及轨迹生成,卫星星历推算和导航电文信息的产生,高动态高精度复杂信号波形产生方法及射频信号调制方案,信号功率、调制码和载波传播误差的计算,环境噪声和干扰的影响,以及最终的测量数据分析和接收机性能评估等。其中一个关键的难点问题是对于一定环境下到达 GPS 接收机天线的多个卫星信号的各项波形参量的确定,特别是各卫星信号到达目标时的信号电平,以及由多项误差源引起的 GPS 信号的群延迟和相延迟误差的确定。这些误差源一般包括星历误差、星钟误差、电离层延迟误差、对流层延迟误差、多径误差、相对论效应和地球自转引起的误差等。另外还需要考虑模拟器时钟的不稳定性以及各通道的延迟偏差。GPS 信号模拟器必须精确地模拟各可见星信号到达接收机时的伪距、载波相位、多普勒频移和信号功率。从增加模拟器功能和性能的目的出发,对多径信号、选择可用性 (SA) 干扰、遮挡和衰减、GPS 接收机天线特性的模拟等是必要的。GPS 信号模拟器作为测试和检验 GPS 接收机性能的设备,其产生信号的精度至少应是被测 GPS 接收机的测量精度的 3 倍以上。在复杂的信号环境下这是一项非常苛刻的要求。

2 待模拟的 GPS 卫星信号分析

GPS 信号模拟器的首要任务便是模拟产生特定环境下 GPS 接收机天线所接收到的 GPS 卫星信号。当限定被测接收机为单频 L1 C/A 码接收机时,则在 GPS 系统时 T 时刻待模拟的信号可表示为

$$R_{L1}(T) = \sum_{j=1}^N \sqrt{2P_r^j} C^j(T - \tau_g^j) D^j(T - \tau_g^j) \cos[2\pi(f_{L1} + f_d^j)(T - \tau_p^j) + \phi^j + \phi_{sv}^j(T) + 2\pi d(T^2/2)] + n(T) + R_{L1-MP}(T) \quad (1)$$

¹ 2003-01-28 收到, 2003-04-21 改回
自然科学基金资助项目 (批准号 60027001)

式中 N 为 T 时刻的可观测卫星总数 (模拟器通道数应不小于 N , 一般有 $3 < N < 12$, 通道数取为 12), j 为可观测卫星的编号, P_r^j 为接收信号功率, $C^j(\cdot)$ 和 $D^j(\cdot)$ 分别为第 j 颗卫星的 C/A 码和导航电文数据, τ_g^j 为码传播延迟 (群延迟), τ_p^j 为载波传输延迟 (相延迟), $f_{L1} = 1575.42\text{MHz}$ 为 L1 载波频率, f_d^j 为载波多普勒频移, ϕ^j 为 L1 载波相位差的固定项, $\phi_{sv}^j(T)$ 为随机相位误差项, $2\pi d(T^2/2)$ 为频漂或老化效应造成的相位偏差. $n(T)$ 为背景噪声项, 这里将 L1 P 码信号视为随机噪声并入 $n(T)$ 中, $R_{L1-MP}(T)$ 为多径误差项.

传播延迟包含以下各项:

$$\tau_g^j = R^j/c + \tau^j + \delta t_{\text{ion}}^j, \quad \tau_p^j = R^j/c + \tau^j - \delta t_{\text{ion}}^j \quad (2)$$

$$\tau^j = \delta t_{\text{sv}}^j + \delta \rho_{\text{eph}}/c + \delta t_{\text{SA}}^j + \delta t_{\text{rel}}^j + \delta t_{\text{tro}}^j + \delta \rho_{\omega}^j/c + (\delta t_{\text{mp}}^j) \quad (3)$$

式中 R^j 为卫星到接收机的真距, c 为光速, τ^j 为除了电离层延迟误差之外的其他传播延迟误差, δt_{ion}^j 为电离层延迟误差, δt_{sv}^j 为卫星钟差, $\delta \rho_{\text{eph}}^j$ 为星历误差, δt_{SA}^j 为 SA 干扰项, δt_{rel}^j 为相对论效应引起的误差项, δt_{tro}^j 为对流层延迟误差, $\delta \rho_{\omega}^j$ 为由地球自转引起的卫星位置误差, δt_{mp}^j 为多径时延.

设载波相位偏移量:

$$\varphi^j = -2\pi(f_{L1} + f_d^j)\tau_p^j + \phi^j + \phi_{sv}^j(T) + 2\pi d(T^2/2) \quad (4)$$

由 (1), (2), (3), (4) 式可知, 在任一时刻要模拟的信号的状态只需由以下 $(2 + N \times 5)$ 个参量来描述:

$$\{T, N, j, P_r^j, f_d^j, \tau_g^j, \varphi^j\}$$

给定对仿真起始时刻 T_0 , 截止时刻 T_E 和仿真数据的采样频率 $f_S = 1/T_S$ 的要求之后, 则模拟器所需仿真模拟的信号完全可以由上述参量的时间序列流来控制:

$$\{T, N(T), [j, P_r^j, f_d^j, \tau_g^j, \varphi^j](T)|_{j=1,2,\dots,N}\}, \quad T = T_0, T_0 + T_S, T_0 + 2T_S, \dots, T_E \quad (5)$$

这样 GPS 信号模拟器的高精度设计除了对硬件调制电路的准确性和稳定性提出要求之外, 在信号计算上的难点归结为决定信号状态的几个波形参量的估计问题.

3 信号功率与传播延迟的估计方法

在给定了接收机载体的运动轨迹数据之后, (5) 式中 N, j, f_d^j 的计算都不成问题, 而 $P_r^j, \tau_g^j, \varphi^j$ 的估计则相当困难, 采用一般的经验模型是难以满足要求的.

就时间参量 τ_g^j, φ^j 的精度而言, 一般在 GPS 接收机中为了提高测距精度, 试图对每一项主要误差源分别建立起数学模型, 对其误差分别作出估计和校正; 而这些模型应用于 GPS 接收机时或多或少地会带来技术和计算的复杂性, 以及不可避免的模式残差. 如果在 GPS 信号模拟器中采用与一般 GPS 接收机相同的模型对各种误差源分别进行计算, 那么所模拟的 GPS 信号延迟与在 GPS 接收机中得到的估计完全一致. GPS 接收机在这样的测试环境中得到的导航解输出可以完全消除这些误差的影响, 这与 GPS 接收机的实际工作环境是不符合的, 也无法测试出 GPS 接收机的真实测量精度. 以比较典型的电离层延迟误差为例, 双频用户采用双频改正法消除电离层影响的有效性高达 95%, 而单频 GPS 用户则只能依据一定的模型进行估计. 目前通用的是由 J. A Klobuchar 等人在 Bent 模型基础上简化修改而来的 Klobuchar 模型, 其有关的 8 个修正参数由 GPS 主控站推算出来并随导航电文播发^[4,5]. 用户模拟器如果根据同样的参数、同样的模型计算和模拟电离层延迟, 则接收机的定位结果可以完全消除电离层影响.

有大量文献致力于研究针对不同误差源的更为精确的数学模型。在 GPS 信号模拟器引入最新研究成果, 对每一项误差源进行分析并建立起精确的数学模型是非常消耗资源的^[6]。要保证在所有这些模型残差的影响下, GPS 信号模拟器能够达到其精度设计指标, 并提供实时测试能力是非常困难的。

那么如何得到高度逼真的模拟数据呢? 事实上 GPS 模拟器作为测试接收机性能的仿真平台, 其所产生的信号不必一定是 GPS 接收机在指定工作环境下所实际接收的卫星信号的完全再现。从仿真和测试的目的出发, 只要所模拟信号的结构、导航电文内容与实际 GPS 卫星信号相符, 决定信号状态的几个关键参数的主要统计特性及其随时间、天气等环境条件变化的规律与实际 GPS 工作状态相符合即可。

另一个难以确定的参量是各卫星信号到达目标时的信号电平(强度/功率)。已知 GPS L1 C/A 码信号到达地面时的信号功率在 $-160\text{dB} \sim -153\text{dB}$ 范围内, 功率的高低与卫星发射功率、卫星姿态和天线指向、卫星的方位、大气衰减等因素有关, 其值也是难以直接确定的^[4]。

一个有效的方法是采用人工神经网络(ANN)对这些参量进行实时估计。ANN 是由大量并行运算的功能简单的神经元连结而成的非线性动力学系统, 其特色在于信息的分布式存储和并行协同处理, 具有集体运算能力和自适应学习能力, 善于联想、综合和推广, 并具有很强的鲁棒性^[7]。ANN 的一个典型应用领域就是进行复杂非线性函数的逼近。为了解决以上所述信号状态参量计算的困难并满足模拟器计算精度的要求, 本文建立了一个 ANN 来对 GPS 信号状态参量进行估计。这一 ANN 在经过大量合格的样本数据训练之后, 其输出可以相当逼真地模拟真实情况下到达 GPS 接收机的信号状态。

4 基于人工神经网络的 GPS 信号模拟器设计

4.1 GPS 信号模拟器结构

本文所设计的多通道 GPS 信号模拟器系统结构采用计算机加周边部件互连(PCI)卡的形式。计算机完成导航电文和信号状态流计算, PCI 卡完成信号的扩频、BPSK 调制和射频调制。整个闭环测试系统的组成由图 1 所示。

在信号计算部分中 ANN 信号状态估计模块是相对独立而又非常关键的一个环节, 它的模拟结果影响到整个模拟器的精度和稳定性等性能。

4.2 神经网络模型的建立

随着对整个模拟器功能和性能的设计目标的不同, 这里的 ANN 输入信息可以有时间(日期、时、分、秒), 环境因素(多径特性、地域特性、天气状况), 干扰特性(有无 SA 干扰、其他干扰源特征), 卫星信息(仰角、与接收机距离)等与待估信号状态参量有关的信息。输出分别为 P_r^j , τ_g^j , φ^j 等待估计信息。

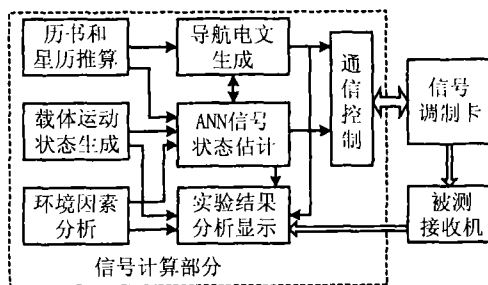


图 1 GPS 信号模拟器系统结构

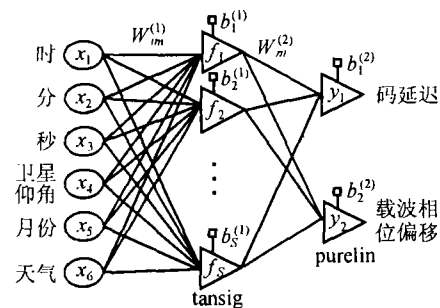


图 2 ANN 信号延迟参量估计器结构

ANN 理论已经证明, 含有偏差项和至少一个 S 型隐含层加上一个线性输出层的 BP 网络能够实现任意复杂的非线性映射问题. 增加层数可以进一步提高精度, 但同时也使网络复杂化, 增加了训练时间. 而误差精度的提高实际上也可以通过增加隐含层中的神经元数来获得, 其训练效果也比增加层数更容易观察和调整. 本文采用含有一个 S 型隐含层的两层 BP 网络作为信号状态参量估计器. 以信号传播延迟参量的估计为例, 输入节点取为 7 个, 由 3 项时间量小时、分钟和秒, 卫星仰角, 月份, 环境量和常值偏差项构成. 其中环境一项对不同的天气状况和地貌特性的组合进行量化取值. 隐层神经网络的决策函数采用正切 S 型 (tansig) 函数, 输出层采用线性 (purelin) 函数, 这样网络的输出可以取任意值. 建立起的 ANN 模型如图 2 所示.

设 s 为隐层神经元数, ANN 的正向计算公式如下:

$$S_i = \sum_{m=1}^6 W_{im}^{(1)} x_m + b_i^{(1)}, \quad f_i = (1 - e^{-S_i}) / (1 + e^{-S_i}), \quad i = 1, 2, \dots, s \quad (6)$$

$$y_n = \sum_{i=1}^s W_{ni}^{(2)} f_i + b_n^{(2)}, \quad n = 1, 2 \quad (7)$$

4.3 ANN 的训练和验证

本文所设计的神经网络可以利用 MATLAB 的神经网络工具箱提供的功能进行训练. 以网络输出误差量的平方为训练的误差目标, 其大小根据对 ANN 输出参数的精度要求来确定. 两层权值采用附加动量法和自适应学习速率进行训练. 由于待模拟参量的复杂性, 要求网络模拟结果在统计意义上逼近实际值, 即其主要统计指标如均值、方差, 以及最大最小误差值逼近实测值.

ANN 要求的输入输出量即训练和验证用的样本数据的采集必须精心设计. 这里以对伪距延迟参量 τ_g^j 的估计为例进行说明. 我们在前期的研究工作中参考文献 [4, 5, 8, 9] 中的各项误差模型已经开发了计算伪距误差的程序, 本文在此基础上采用实际用户位置数据和相对应的星历数据计算其中任一颗星的伪距数据, 作为 ANN 仿真和原理性验证的样本数据, 在伪距中加入了电离层误差、对流层误差、多径误差和 SA 误差. 在得到的 600 组数据中选取 350 组作为训练样本, 其它 250 组作为验证样本. 所用数据段的卫星仰角在 5° – 25° 度之间, 故得到的伪距误差值较大, 在 100m 左右. 神经网络训练的收敛过程如图 3 所示, 由图可见训练开始时收敛速度较快, 接近误差目标时速度减慢.

网络训练的输出值与样本值 (归一化值) 示于图 4; 网络验证输出伪距误差与输入样本值的比较示于图 5 和图 6. 网络验证输出值统计特性与样本值统计特性的比较见表 1.

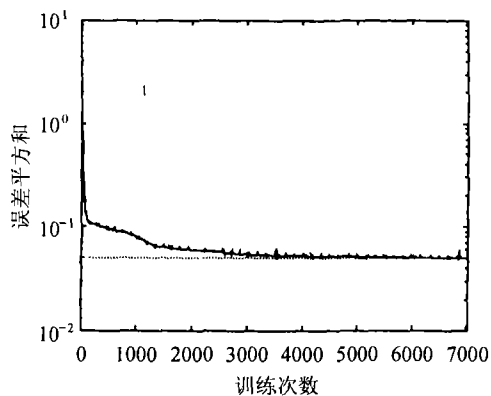


图 3 ANN 训练误差的收敛过程 (训练 7016 次)

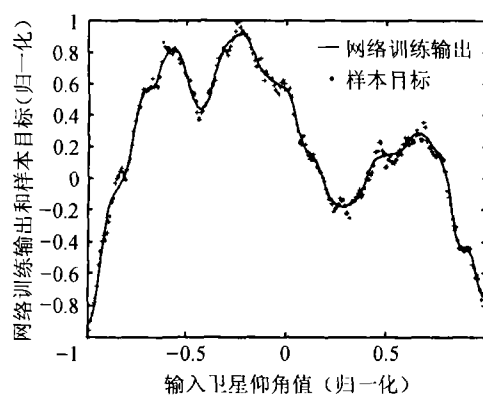


图 4 ANN 训练输出值与样本值的比较

可见 ANN 较好地模拟了样本数据, 在统计意义上逼真地再现了原始样本数据。显然用训练得到的权值和偏差对伪距误差进行正向计算的过程比起采用复杂的误差模型分别计算各可见星的各项伪距误差, 计算效率大有提高, 使多通道模拟器的实时性得到保证。

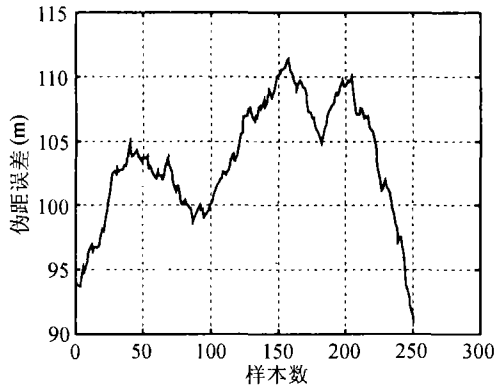


图 5 验证用伪距误差样本数据

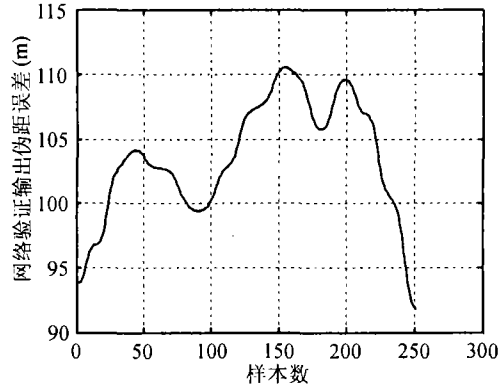


图 6 ANN 网络验证输出伪距误差

表 1 ANN 验证输出伪距误差值与样本值主要统计特性的比较

统计特性	均值	标准离差	最大值	最小值
验证用样本数据集	103.5	4.616	111.5	90.89
网络输出数据集	103.49	4.574	110.6	91.84

5 结论及建议

本文在分析待模拟的 GPS 卫星信号的数学模型的基础上, 基于人工神经网络 (ANN) 理论, 提出一种适用于 GPS 信号模拟器的信号状态参量估计方法——利用 ANN 来模拟到达 GPS 接收机的信号传播延迟、载波相位、信号功率等因众多误差因素而难以直接确定的参量, 并设计了基于神经网络的 GPS 信号模拟器的结构。理论分析和仿真实验结果表明这一方法是切实有效的。

利用 ANN 进行多通道 GPS 卫星信号模拟器参量估计可以在以下几个方面进一步展开研究:

(1) 以 P_r^j , φ^j 作为输出参量的仿真。另外由于模拟器需要在导航电文中提供 8 个电离层修正参数, 这些参数同样是受很多因素的影响而不易确定的, 在实际 GPS 系统中由主控站根据对电离层效应的精密观测数据和经验模型进行外推计算并在导航电文中发播。而在模拟器中对仿真时间任意性、功能完善性和成本的要求使我们必须寻求其它途径。我们需要计算出任意季节和时间、任意地理位置、太阳及其它天球辐射的各种变化条件下的电离层修正参数和电离层延迟误差提供给用户。采用 ANN 进行估计不失为一种有效的方法。

(2) 输入参数中考虑更多的因素, 如卫星和接收机位置、环境信息等有关因素。

(3) 使所设计的 ANN 具有重构能力, 可以随着应用环境和功能要求的不同增加或减少输入和输出节点。也可以在应用环境有较大改变时重新对 ANN 进行训练, 得到新的更适用的权值和偏差量值。

参 考 文 献

- [1] M. Baker, B. Dingman, W. Gregg, High fidelity GPS satellite simulation, Washington, AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference, New Orleans, USA, AIAA, 1997, 213-223.

- [2] M. C. Moreau, M. Wennersten, *et al.*, Test results of the PiVoT receiver in high Earth orbits using a GSS GPS simulator, ION GPS 2001, Salt Lake City, ION, 2001, 2316–2326.
- [3] I. C. Billing, STR4760 Multi-channel GPS/SBAS simulator product specification, England, Spirent Communications, Inc., 2000, 1–28.
- [4] B. W. Parkinson, J. J. Spilker Jr., Global Positioning System: Theory and Applications (Volume I), Washington, AIAA, 1996, 82–93, 485–516.
- [5] E. D. Kaplan, Understanding GPS: Principles and Applications, Boston, Artech House, 1996, chapter 7.
- [6] S. K. Gupta, M. K. Low, C. W. Tan, A new approach to simulate GPS measurement, IEEE Conference on Position, Location and Navigation, CA, U.S.A., 1998, 236–242.
- [7] 丛爽, 面向 MATLAB 工具箱的神经网络理论与应用, 合肥, 中国科学技术大学出版社, 1998, 1–15.
- [8] Lupash Consulting, Matlab GPS Software Toolbox User's Guide And Reference Manual (Version 3.01), Fullerton, USA, Lupash Consulting, 2001, 23–176.
- [9] A. Leick, GPS Satellite Surveying (2nd ed.), New York, Wiley-Interscience, John Wiley & Sons, 1995, 286–316.

GPS SATELLITE SIMULATOR SIGNAL ESTIMATION BASED ON ANN

Kou Yanhong Yang Dongkai Chang Qing Zhang Qishan

(School of Electron. Eng., Beijing Univ. of Aeron. and Astron., Beijing 100083, China)

Abstract Multi-channel GPS satellite signal simulator provides realistic test signals for GPS receivers and navigation systems. In this paper, signals arriving the antenna of GPS receiver are analyzed from the point of view of simulator design. Focus is put on the estimation methods of several signal parameters that are difficult to determine directly according to existing experiential models due to various error factors. Based on the theory of Artificial Neural Network (ANN), an approach to simulate signal propagation delay, carrier phase, power, and other parameters using ANN is proposed. The architecture of the hardware-in-the-loop test system is given. The ANN training and validation process is described. Experimental results demonstrate that the ANN designed can simulate sample data statistically in high fidelity. Therefore the computation of signal state based on this ANN can meet the design requirement, and can be directly applied to the development of multi-channel GPS satellite signal simulator.

Key words Artificial neural network, GPS, Simulator, Signal estimation, Pseudorange error

寇艳红: 女, 1969年生, 在职博士生, 主要研究方向为卫星导航, 智能交通, 无线通信等。
杨东凯: 男, 1972年生, 博士后, 副教授, 主要研究方向为卫星定位, 智能交通, 位置服务系统等。
常青: 男, 1962年生, 博士后, 副教授, 主要研究方向为GPS定位, 信号处理的数学方法等。
张其善: 男, 1937年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为卫星导航, 信息传输与处理, 智能交通等。