

GPS智能天线接收系统的模型与分析

王李军^{1,2} 杨小牛¹ 赵惠昌²

(1.通信系统信息控制技术国家重点实验室, 嘉兴, 314001; 2.南京理工大学电子工程系, 南京, 210094)

摘要:本文首先分析了GPS面临的特殊环境, 然后给出了智能天线接收的信号模型和系统模型, 并对比分析了基带采样和中频采样各自的优势; 给出了适用于GPS实现的波束形成算法, 并简要分析了各自的优缺点; 最后给出了GPS智能天线接收系统的硬件实现结构, 分析了各部件的实现方法及可行性。

关键字:GPS, 智能天线, 自适应波束形成, 软件GPS接收机

The Modeling and Analysis for GPS Receiver Based on Smart Antenna

Wang Lijun^{1,2} Yang Xiaoniu¹ Zhao Huichang²

1. Postdoctoral workstation, No.36 Research Institute of CETC, Jiaxing 314001, P. R.China

2. Lab of Anti-Jamming of Fuze, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, P. R.China

Abstract: In this paper, the special environment for GPS is analyzed. The signal model and system model of GPS receiver based on smart antenna is given, and the advantage of baseband sampling and IF sampling is analyzed, respectively. The beamforming algorithms for GPS application are listed, whose advantages and shortcomings are shortly analyzed. Finally, the hardware implementation principle of GPS receiver based on smart antenna is proposed, whose implementation approach and feasibility of every component is described.

Key Words : Global Positioning System, Smart Antenna, Adaptive Beamforming, Software GPS Receiver

1 引言

GPS作为一种比较理想的定位、授时和导航工具已经引起了各国的普遍关注, 然而GPS接收信号功率低, 故其极易被有意或无意的信号干扰而丧失上述功能^{[1][2]}。为此许多国家都针对该问题进行了广泛的研究, 提出了许多切实可行的方法, 其中智能天线技术具有很强的抑制干扰的能力, 已成为下一代GPS抗干扰技术的发展方向之一^{[3][4]}, 它可以自动调节接收天线的方向图对准所需信号的入射方向, 从而提高系统的抗干扰能力。

与传统的硬件GPS接收机相比, 软件GPS接收机具有更多的优势^{[5][6]}, 以此为平台, 可以方便地对GPS各种算法进行研究和开发, 并非常容易对其修改和不

断提高系统的整体功能。

2 智能天线接收信号模型

一般来说, 智能天线系统是由天线阵列、下变频器、ADC和智能天线处理模块等组成的, 如图1所示。天线阵由多个阵元组成, 通过自适应调节波束的指向接收所需的信号。射频到中频(RF-IF)的转换电路完成下变频、滤波和放大等功能。

假设阵列采用归一化各向同性的线性阵列, 阵元数为M, 某时刻卫星信号到达接收机的入射角为 \mathbf{q}_i , 则第k个阵元在时刻t的接收信号可以表示为

$$x_k(t) = s(t) \cdot \exp[-j2\pi d(k-1) \sin \theta_i / \lambda] + n_k(t) \quad (1)$$

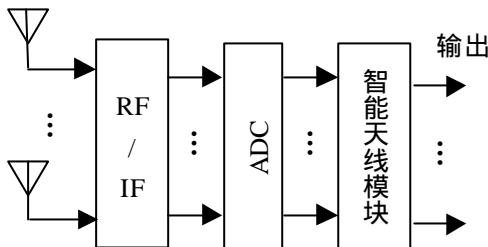


图1 智能天线接收系统模型

其中， $s(t)$ 为信号的包络， \mathbf{I} 为信号的波长， \mathbf{q}_i 为信号入射方向角（DOA）， $n_k(t)$ 为第k个阵元的高斯白噪声，d为阵元之间的间隔。

若自适应阵列在时刻t的各阵列的加权为 \mathbf{w}_k ，则阵列的输出可以表示为

$$y(t) = \sum_{k=1}^M \mathbf{w}_k^* x_k(t) = \mathbf{w}^H \mathbf{x}(t) \quad (2)$$

矢量 \mathbf{x} 可以进一步表示为

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{a}(\mathbf{q})s(t) + \mathbf{n}(t) \quad (3)$$

$\mathbf{a}(\mathbf{q})$ 为阵列的方向矢量，即

$$\begin{aligned} \mathbf{a}(\mathbf{q}) = & [1, \exp(-j2pd \sin q_i / \mathbf{I}), \dots, \\ & \exp(-j2p(M-1)\sin q_i / \mathbf{I})]^T \end{aligned} \quad (4)$$

当存在干扰信号时，自适应波束形成技术通过合适的自适应算法获得最佳权矢量，从而抑制干扰信号，并使有用信号的输出SNR最大。

3 GPS智能天线接收系统模型

图2和图3分别给出了单路基带采样和中频采样的GPS接收机结构。基带采样结构在ADC之前已经完成了放大、下变频、滤波等大部分的功能，但是在信号处理上缺乏灵活性。中频采样结构克服了基带采样结构的缺陷，它对接收信号的IF进行数字化，保留了更多的信息，通过数字下变频（DDC）后对信号进行处理，相对而言采用了更少的硬件元件，将大部分的功能通过软件编程的方法实现，增加了系统处理的灵活性和可重复性。

GPS智能天线系统接收模型如图4所示。它是由接收天线、射频前端、ADC及自适应信号处理模块等主要部件构成。在接收阵列中，对每一个天线单元接收到的信号都下变频到中频，然后送入A/D和自适应处理模块进行数据的采集和接收处理，这种方法保留了天线获得的各个阵列信号所包含的全部信息，加上数

字处理的灵活性，可得到超出普通阵列天线的性能。

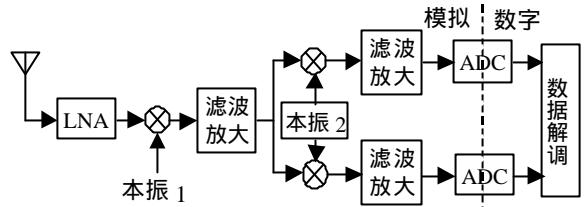


图2 基带采样的接收机结构

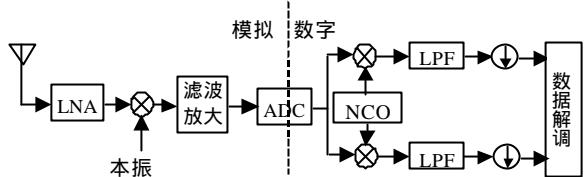


图3 中频采样的接收机结构

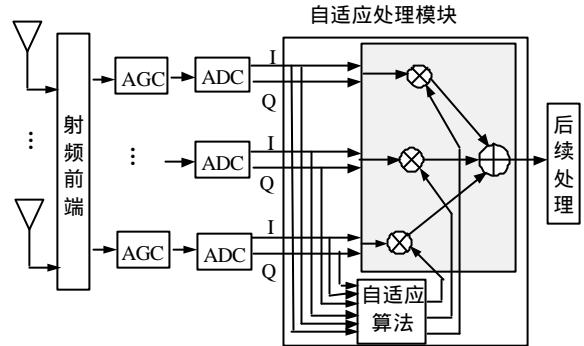


图4 智能天线GPS信号接收原理图

射频前端将每一路的射频输入信号放大、滤波和下变频到一个固定的中频。A/D模块完成数据的采集功能，中频AGC电路调整信号的输出使其满足A/D动态范围的要求，然后将信号送给自适应信号处理模块，形成波束或零陷，也即在信号的方向上形成波束，在干扰的方向上形成零陷，从而达到提高信噪比，抑制干扰的目的。

4 波束形成算法

目前，波束形成算法种类繁多，这里给出几种适合GPS使用的算法^[7]，并作简单分析。

（1）基于先验信息的波束形成算法

GPS卫星的位置可以通过星历或历书得出，GPS载体的位置可以事先确定（固定目标）或通过其它方式测量得到（比如INS），由此可以得出载体与卫星之间的方位角，即先验信息。该方法将波束直接指向卫星信号，可以提高信号的信噪比，但对干扰信号的抑

制能力不足。

(2) 自适应功率最小化波束

该方法采用LMS或其它的自适应算法最小化预相关接收信号的功率，由于GPS信号的功率深埋于噪声之下 $18\sim30$ dB，而干扰信号功率往往大于噪声的功率水平，因此该方法可以有效抑制强干扰信号，但是不能保证接收信号信噪比的提高。

(3) 基于干扰信号DOA的波束算法

该方法利用MUSIC算法或其它的特征矢量技术首先确定干扰信号的DOA，然后在干扰信号的方向上产生零陷以抑制干扰信号，该方法的实现过程相对复杂一些。

(4) 维纳滤波波束算法

该方法与方法(1)一样需要方位角作为先验信息，不同之处它利用输入数据的自相关矩阵，对空间波束进行最优化处理，从而有效抑制干扰信号，提取有用信号。

(5) 最大似然波束算法

该方法不需要上述的先验信息，是一种盲信号处理技术，充分利用信号与干扰之间的不同特性，最优化空间波束。可以取得比较理想的效果，可惜信号处理非常复杂，工程上实现比较困难。

上述几种波束形成算法可以用图5描述，从图中可以清晰的看出各种方案的实现过程。

5 硬件实现原理与技术分析

图4给出了智能天线系统接收模型是从系统级的角度给出的，没有具体到各个相关模块的设计问题，为此图6给出了完整的硬件实现原理，该模型包含了射频前端、智能天线信号处理、卫星信号捕获跟踪、环路滤波、IMU辅助以及导航解算等关键部件。为硬件设计提供了详细的参考。

智能天线信号处理模块是该模型的核心之一，牵扯的算法也比较复杂，因此可以采用DSP器件实现；卫星信号捕获跟踪可以采用专用的ASIC或FPGA实现，FPGA实现具有更大的设计灵活性，可以根据实际需要对算法进行改进或重新设计。导航解算采用普通的ARM器件即可实现。由此可见，要使系统可靠

工作，需要合理设计各部件，使之协调有序工作。

另外需要指出的是在图6中，ADC之后给出的只是其中一路卫星信号的接收原理，其它各路与此类似，实际上是一个完全并行的处理过程。这样不仅可以有效提高各路卫星信号的信噪比，也可也避免由于天线自由度不够而导致的干扰抑制性能下降问题。

6 小结

目前，GPS正面临着复杂的电磁环境，各种有意无意的干扰大大降低了GPS的可用性。本文给出了GPS智能天线接收的信号模型和系统模型，并对比分析了基带采样和中频采样各自的优势，分析表明在数字化技术日益发达的今天，中频数据采集后用FPGA或DSP进行处理具有更大的优势和设计的灵活性。本文给出了适用于GPS应用的波束形成算法，并简要分析了各自的优缺点；最后给出了GPS智能天线接收系统的硬件实现结构，并分析了各部件的实现方法及可行性，该模型可为GPS智能天线系统的分析设计和应用提供参考。

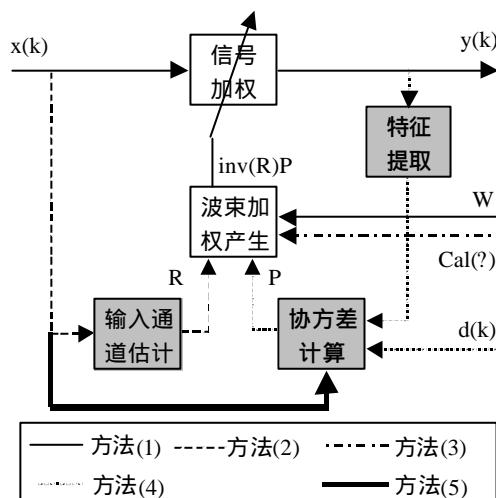


图5 波束形成算法实现过程示意图

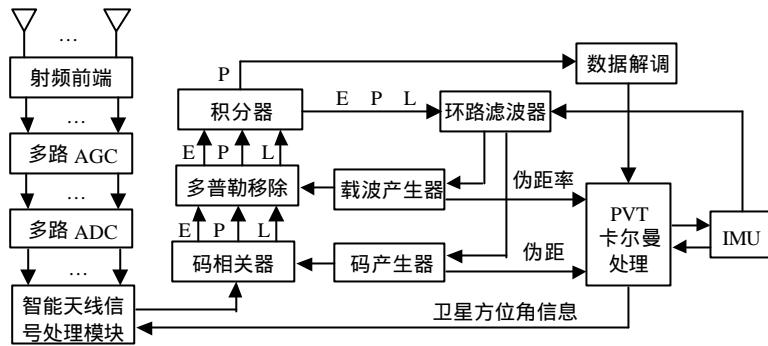


图6 GPS智能天线硬件实现原理图

参考文献

- [1] 邱致和, 王万义[译]. GPS原理与应用. 北京: 电子工业出版社, 2002
- [2] 曾清平, 万山虎等. GPS制导系统与雷达对抗问题讨论. 空军雷达学院学报. Vol.18, No.2. 2004: 64-67
- [3] Minseok Kim. Hardware Implementation of Signal Processing in Smart Antenna Systems for High Speed Wireless Communication. PhD. Dissertation. Department of Electrical and Computer Engineering. Yokohama National University. 2004
- [4] Gonzalo Seco Granados. Antenna Arrays for Multipath and Interference Mitigation in GNSS Receivers. PhD. Dissertation. Department of Signal Theory and

- Communications. Universitat Politècnica de Catalunya. 2000
- [5] Henrik Ripa Mikael Larsson. A software implemented receiver for satellite based augmentation systems – An enhancement to Global Navigation Satellite Systems. Master's thesis. Department of Computer Science and Electrical Engineering, Luleå University of Technology, 2005
- [6] Akos, D. A Software Radio Approach to Global Navigation Satellite System Receiver Design Ph.D. dissertation, Ohio University, 1997
- [7] Jow-Hsin Li. Study of Adaptive Antenna Array for GPS Interference Mitigation. Master's thesis. National Cheng Kung University. 2005.

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com)，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>