

The Design to Improve Anti-Interference Performances of GPS in Rolling Condition

Hongbing XIAO¹, Zhaohui LI²

¹School of Computer and Information Engineering, Beijing Technology and Business University, Beijing, China

²School of Information Engineering, Communication University of China, Beijing, China

Email: x.hb@163.com, lizhh@cuc.edu.cn

Abstract: Two methods including interference aided correction and dynamic beam forming are discussed to deal with the special environments. The way of interference aided correction makes use of inference signal to obtain the roll angle and revolutions; in turn these signals are input to the dynamic beam forming circuit which could adjust the antenna beam in real time. Moreover, a whole GPS receiver solution for spinning projectile is put forward. Rotation demodulation loop is specially designed and added before the carrier loop and PRN code loop to demodulate the rotation-modulated signals. Results show that these solutions are effective in enhancing anti-interference performances of GPS.

Keywords: rolling; GPS; interference; instantaneous beam control

一种增强旋转态 GPS 接收性能的设计

肖洪兵¹, 李朝晖²

1. 北京工商大学计算机与信息工程学院, 北京, 中国, 100048

2. 中国传媒大学信息工程学院 北京, 中国, 100024

Email: x.hb@163.com, lizhh@cuc.edu.cn

摘要: 为增强旋转弹载卫星定位信号接收系统的抗干扰性能, 本文研究了旋转弹载 GPS 接收系统的抗干扰设计: 利用干扰信号导航以及基于此项技术的即时波束控制方案。利用干扰信号导航技术以电子干扰系统所发出的干扰信号为参考, 获取转角以及转速等信息; 即时波束控制技术则实现波束的动态调整, 达到抗干扰的效果。最后, 给出了旋转弹载卫星定位信号接收系统的设计方案。针对旋转特性, 增加了旋转跟踪解调环, 用于对旋转的跟踪与解调。结果表明, 本方案起到了增强旋转弹载 GPS 接收系统的抗干扰性能的效果。

关键词: 旋转; GPS; 干扰; 即时波束控制

1 引言

当旋转弹在敌方的电子干扰下飞行时, 常规 GPS 抗干扰系统无法适应天线高速转动造成的调制, 这就使得开发低成本的能够在旋转弹上进行抗干扰导航的技术显得十分重要。根据 GPS 的旋转动态特性, 可采用恰当的操作策略, 抑制干扰源及采取抗干扰技术以增强抗干扰能力。利用抗干扰技术的特性, 可将这些抑制或减小干扰的技术分成三种类型: 滤波技术、GPS/惯性耦合以及波束控制。

为增强旋转弹载卫星定位信号接收系统的性能, 本文提出了旋转弹载 GPS 接收系统抗干扰设计。本设计中充分考虑到可能的干扰情况, 并针对此提出了强干扰

辅助导航技术以及基于干扰辅助导航的即时波束控制技术。因此, 本文介绍以即时波束控制技术为核心, 利用干扰信号增强旋转弹载 GPS 接收系统性能的方案。

2 GPS 干扰信号辅助导航的原理

GPS 利用干扰信号导航技术, 就是以电子干扰系统所发出的干扰信号为参考, 获取转角以及转速信息。该技术是从干扰源的角度所提出的抗干扰技术。GPS 导航系统往往使用全向天线来降低幅度和相位调制的影响, 这种方法在强干扰情况下性能很差, 因为 GPS 信号和干扰信号同时被系统以相同的增益接收。本文使用的定向天线可以提高系统的抗干扰能力, 因为 GPS 接收机中的自动增益控制电路 (AGC) 在天线朝向干扰源时会

自动降低系统增益，在朝向卫星时会提高系统增益；问题是定向天线会造成很大的旋转相位调制，系统性能仍非最优，在天线朝向干扰源时，系统接收到的信号也会被处理。这时系统信噪比接近于零。此时，旋转造成的幅度和相位调制连同外界干扰信号使跟踪和捕获导航信号非常困难。但是，巧妙地利用干扰源所发出的定向干扰信号，就可以实现一种在高强度干扰下应用于旋转弹体上的实用、低成本技术，即利用干扰信号导航技术，来捕获和跟踪 GPS 信号。

当弹丸旋转时，任何不在旋转轴线上的信号都会被调制，任何干扰信号都被认为比 GPS 信号和背景噪声信号的幅度大的多，接收到的幅度调制信号主要来自干扰源。弹丸中的片状微带定向天线接收到的带有幅度调制的 GPS 信号^[1]如图 1 所示。其中，X 轴表示时间（旋转角是时间的积分），Y 轴表示在某个仰角下接收到的 GPS 信号的幅度。通过实验可知：在大仰角的情况下，GPS 信号有明显的幅度调制。接收信号的调制输出既可以用来确定转速，也可以用来确定干扰源的方向。

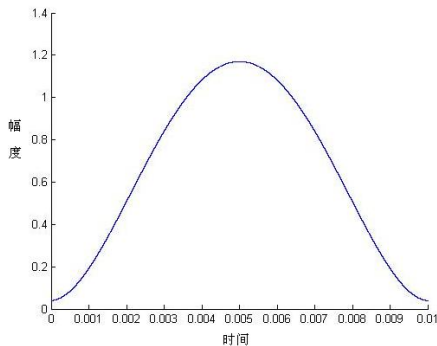


Figure 1. GPS amplitude-modulated signal received by trip-antenna

图 1. 片状微带天线接收到的带有幅度调制的 GPS 信号

干扰信号导航技术，在旋转体中利用干扰信号测量弹体旋转角度，可使 GPS 接收机在强干扰情况下捕获和跟踪弱信号。其特点是利用干扰信号的幅度调制来确定弹体的旋转速度并辅助获取导航信号。该干扰信号辅助导航系统利用干扰信号的调制提供一旋转角估计。

天线接收到干扰信号和导航信号，其后的射频(RF)处理功能模块处理干扰信号和导航信号，将它们变换为中频并数字化；在 RF 处理器后有一个信号强度检测器和一个跟踪滤波器，强度检测器用来确定干扰信号的强度，并提供一个调制信号输入跟踪滤波器，跟踪滤波器跟踪干扰信号的幅度变化并给出弹体旋转速度的估计

值。

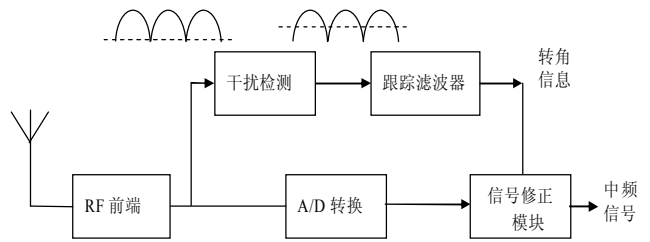


Figure 2. Principle of navigation with jamming help

图 2. GPS 干扰信号辅助导航的原理

跟踪滤波器中的混频器，将接收到的调制信号与解调信号混频。跟踪滤波器中的滤波器用于处理混频器的输出，并提供相位差反馈信号。跟踪解调器接收这个反馈信号，并提供一个解调信号和旋转角的估计值。

GPS 干扰信号辅助导航的原理如图 2 所示。

利用干扰信号导航技术可以应用于多种旋转弹体，旋转的方向和转速并不是最主要的因素。影响该导航技术的因素主要是弹体转动变化率（旋转加速度）而不是旋转速度。利用干扰信号导航技术主要有以下两个方面：一是强方向性干扰，二是该干扰信号由于弹体的旋转被调制。

一般情况下旋转弹体接收的干扰信号具有未知的幅度和相位，但是接收到的信号功率被旋转调制成旋转角的函数。通过将接收信号的功率调制信号和预估的旋转调制信号进行相关，可以确定弹体的旋转角度。由于干扰信号的干扰方向未知，旋转的瞬时相位也无法立即得到。在 GPS 应用中导航信号一般来自多个不同的方向，一旦旋转速度（或转角）被确定，系统就可以在干扰源相反方向上找到期望的导航信号。通常可使用模拟或数字的手段提高非干扰方向上的信号处理增益。这种提高增益的办法可以提高 GPS 信号的信噪比，从而允许系统在强干扰情况下进行工作。

3 即时波束控制的抗干扰方案设计

利用干扰信号导航技术的核心是跟踪滤波器的设计。根据应用环境的不同，跟踪滤波器可分别采用开环设计和闭环设计两种方式。本文只讨论闭环设计。

3.1 跟踪滤波器的设计

经过理论设计，本文选用了三阶环路低通滤波器，其输入输出关系为^[2]：

$$\frac{741.0+0.7s}{10.0+6.76s+0.04s^2+0.0001s^3}$$

采用该环路低通滤波器的闭环跟踪滤波器的设计如图 3 所示。这时，图中的输入信号来自于干扰检测器或 AGC 控制信号。干扰检测器或 AGC 控制信号中输入的调制幅度信号 $A(t)$ 在两个混频器中与超前解调信号和滞后解调信号（在跟踪解调器中产生）混合。混频器可以看作简单的解调器。混频器的输出分别通过低通滤波和放大。在加法器中从超前通道输出的信号减去滞后通道输出的信号，得到一个相位差信号给跟踪解调器，跟踪解调器修正相对于干扰源的旋转角度的估计值。超前解调信号和滞后解调信号一般是输入调制信号的一个简化模型，与旋转角有关，并且是调制函数波形的超前或滞后形式。解调信号一个易于实现的办法是采用简单的开关函数模型。解调信号可以使用一个简单的 $+1/-1$ 增益切换开关来产生，也可采用更复杂的波形来得到最优化的性能。

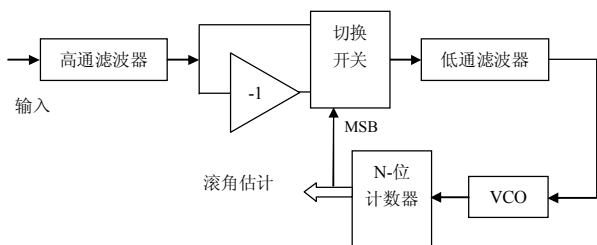


Figure 3. Structure of tracing filter
图 3. 旋转跟踪滤波器组成

跟踪解调器的动态性能是弹体运动状态和干扰信号的函数。一般当解调器已经锁定了调制信号 $A(t)$ 时，使用一个简单的积分器反馈或 PID（比例）调节器就可以了。“锁定”指的是跟踪调节器分析得到的调制频率（弹丸旋转频率）已经足够接近真实频率时，跟踪解调器的反馈相位差可以修正这个旋转频率的估计偏差，并跟踪上真实的频率。

初始时，在实际相位与跟踪解调器估计值之间可能会有一个较大的相位差使得跟踪锁定十分困难。可以采用别的方法，从跟踪滤波器得到一个初始的旋转估计值。可以将不同的跟踪滤波器技术应用在锁相环路中。跟踪滤波器捕获模式的设计需求是由弹体动态特点以及旋转速度的不确定发生和干扰源的预期特点来决定的。一种可行的方法是先增加初始的跟踪带宽，等到频率跟踪上以后再减小跟踪带宽来抵御噪声干扰。一种快速捕捉技术是将旋转估计量设置为常数然后测量相位误差反馈信号的调制频率，相位误差信号的频率与旋转速率估计的误差有直接相关。

跟踪滤波器可采用锁相环技术来提供一个任意位精度的旋转角估计量。调制器或混频器可以用一个隔直电容，一个反相（倒相）器和一个模拟开关组成。低通滤波器产生一个直流/低频信号，它正弦变化于振荡器信号和输入干扰强度调制信号 $A(t)$ 的相位差。锁相环中的频率跟踪解调器可以是一个积分环节或是一个 PID 调节器。低通滤波器和频率解调器可以根据弹体的动态特性和干扰信号的潜在变化来进行优化。可用一个 N 位计数器的最高位（MSB 位）可以用来控制解调器的输出。如图 3 所示。

在跟踪滤波器中可采用快捕技术，将旋转估计量设置为常数然后测量相位误差反馈信号的频率。反馈信号相位差的频率等于输入调制信号 $A(t)$ 的频率和振荡器解调信号频率之差（振荡器信号频率/N）。得到该频率后，就可以调整振荡器频率，并跟踪上 $A(t)$ 频率。

3.2 即时波束控制方案

即时波束控制比传统的空间波束赋形在实际应用中具有更多的优越性。定向天线的波束形状分布相对于弹体而言，在空间上是固定的^[3]。即时波束控制技术不需要宽动态范围的 RF 调制器、A/D 转换器以及高性能信号处理器。用在 A/D 转换器中的 AGC 环路可以在使用低动态范围的 A/D 转换器时持续地优化信号增益。当使用远离干扰信号的天线信号时，GPS 信号的处理是最优化的，所以 RF 级的饱和度要求并不重要。

即时波束控制技术是指动态调整波束方向，以使其获得最大的主瓣，并减小了旁瓣干扰。天线波束赋形的结果等效于增大天线的增益，这样可改善信号干扰比。即时波束控制技术则是利用旋转估计值来临时优化信号增益。具体地，就是当天线指向干扰信号的相反方向时，调整波束，增大信号增益；反之增益取为 0。

利用干扰信号导航的跟踪滤波器的转速（转角）估计来控制即时波束控制器^[1]的原理如图 4 所示。当天线正对 GPS 信号源而背离干扰源时，这个控制器使信号的接收最优化。同样地，即时波束控制信号修正控制器也利用测量的旋转角控制天线的相位参数，进一步提高信号的捕获能力。

基于此，一种简单的即时波束控制实现方案如图 5 所示。当弹体旋转到关断角度 $|\theta_c|$ 之内时，GPS 信号可以通过即时波束控制系统进入下一环节，相位解调模块还可以做相应调整使接收 θ_s （有用卫星信号）方向上的 GPS 信号最优。 θ_s 值的确定方法如下：可以采用上述方法，测量弹体自身的绝对姿态并结合事先已知的 GPS 卫星的方向来计算 θ_s 的值；或者通过调整 θ_s 的估

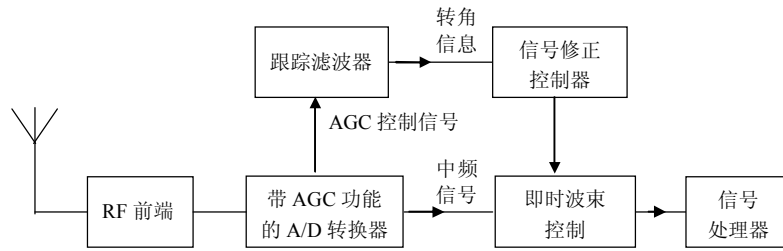


Figure 4. Principle of instantaneous beam control
图 4. 即时波束控制的原理

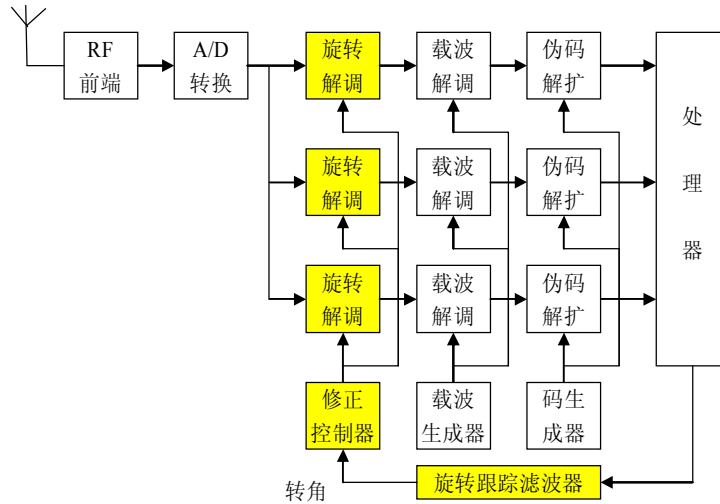


Figure 6. Structure of 2-D spinning projectile trajectory fuze GPS system
图 6. 旋转弹二维弹道修正引信用卫星定位接收系统的组成

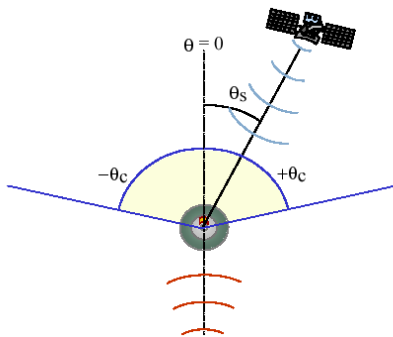


Figure 5. Simple implementation of instantaneous beam control
图 5. 即时波束控制的简易实现

计值来获取最佳的 GPS 信号，从而确定 θ_s 的值，这种方法较简单。

上述方案采用了简单的开关波束控制模型。当天线背向干扰源时，数字化的 GPS 信号得以通过；当转角大于关断角 θ_c (θ_0 是指正好背对干扰源的方位) 时，GPS 信号通不过。如果关断角度 θ_c 为 180 度，意味着没有关断角。

当定向干扰信号的幅度与全向的背景噪声相同时 ($N_i=N_0$)，信噪比提高很小；但是当干扰噪声比背景噪声大得多时 (在干扰情况下)，信噪比提高很大。上面的实验是用一副简单的片状微带天线环绕在弹头前端 (引信) 时进行的。如果在安装一个专门设计的具有良好方向性的天线的情况下，系统信噪比会有更大的提高。

需说明的是，一副相位校正的定向天线在强干扰信号的情况下比全向天线具有更好的性能，即使没有关断角的控制 (或 $\theta_c=180$ 度)。这是因为方向性的天线在一转的范围内总会有一段时间 GPS 信号较强而干扰信号较弱；而全方向性天线在任何时间内接收到的干扰信号的强度都是相同的。这也是选择定向天线而非全向天线的原因。

当然，如果卫星不是与干扰源正好相对 ($\theta_s \neq 0$)，那么信噪比的提高就不会那么显著。例如，在 $\theta_s=60$ 时会比上述情况降低 1.5dB。但是，在较宽的角度范围内信噪比的提高还是比较显著的。

3.3 旋转弹二维弹道修正引信用卫星定位接收系统

与一般 GPS 接收系统^[4, 5]相比, 旋转弹二维弹道修正引信用卫星定位接收系统主要是针对基带单元进行了改进。采用了上述设计后, GPS 接收系统的实现框图如图 6 所示。可以看出, 从左至右依次是: 旋转跟踪解调环、载波跟踪解调环和码跟踪解调环。其中的阴影部分, 就是专门针对旋转环境而设计, 用来对旋转调制进行解调^[6]。

4 结论

本文研究了旋转弹载 GPS 接收系统的抗干扰设计——利用干扰信号的即时波束控制技术。利用干扰信号导航技术以电子干扰系统所发出的干扰信号为参考, 获取转角以及转速等信息; 即时波束控制技术则是借鉴波束赋形技术实现波束的动态调整, 达到抗干扰的效果。这些技术都针对旋转特性而设计, 为增强旋转弹载 GPS 接收系统的性能提供了技术支持。

致 谢

本课题研究工作得到了北京理工大学国家重点实验室以及李世义教授的大力支持。

References (参考文献)

- [1] J.H. Doty. Interference-Aided Navigation System for Rotating Vehicles. U.S. Patent 6,592,070, 2003.
- [2] XIAO Hong-bing. Research on 2-DCCF GNSS Reception algorithms of Spinning Projectile[D]. PhD thesis, Beijing Institute of Technology, 2008
肖洪兵. 旋转弹二维弹道修正引信用卫星定位信号接收算法研究[D]. 北京理工大学博士论文, 2008.
- [3] S. Rounds. Antenna Enhancements, GPS World, February, 2004.
- [4] Elliott D.Kaplan. UNDERSTANDING GPS Principles and Applications[M]. Publishing House of Electronics Industry, 2002.
Elliott D.Kaplan. GPS 接收原理及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002
- [5] James Bao-yen Tsui. Fundamentals of global positioning system receivers: a software approach[M]. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2005.
- [6] ZHANG Jian, Research on GNSS Receiving System in TCF of Spinning Projectile[D], *PhD thesis*, Beijing Institute of Technology, 2005.
张剑. 旋转弹弹道修正引信用卫星定位接收系统原理研究[D]. 北京理工大学博士论文. 2005.