

基于高动态运动模型的多普勒频移仿真

仲伟志, 郭庆

(哈尔滨工业大学通信技术研究所, 哈尔滨 150001)

摘要: 为更好地实现高动态链路中的载波捕获跟踪, 以高动态载体在临近空间中的各种简单运动模型为依据, 对载体相对于临近空间接收平台的多普勒频移变化趋势进行描述和仿真, 在此基础上分析多普勒频移对载波同步产生的影响。理论分析和仿真结果表明, 基于高动态载体运动模型的多普勒频移变化曲线能够正确描述高动态运动方式下的多普勒频移变化趋势。

关键词: 临近空间; 高动态运动模型; 多普勒频移; 载波捕获跟踪

Doppler Frequency Shift Simulation Based on High Dynamic Motion Model

ZHONG Wei-zhi, GUO Qing

(Communication Research Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

【Abstract】 In order to realize carrier acquisition and tracking of high dynamic link better, Doppler frequency shift between high dynamic aircraft and near space receive plat is described and simulated in terms of the motion models of high dynamic aircrafts in near space, and based on the result, the influence on carrier synchronization caused by Doppler frequency shift is discussed. Analysis and simulation results show that Doppler frequency shift achieved in terms of high dynamic motion models can accurately describe Doppler shift trends under high dynamic movement.

【Key words】 near space; high dynamic motion model; Doppler frequency shift; carrier acquisition and tracking

1 概述

临近空间是指距地面 20 km~100 km、处于现有飞机飞行最高高度和卫星运行轨道最低高度之间的空域。近几年来, 临近空间由于其重要的开发应用价值而在国际上引起广泛的关注^[1]。临近空间中高动态载体相对于高空平台的高速运动会使载波产生较大的多普勒频移, 严重影响信号的恢复。因此, 需要采用载波捕获跟踪技术来抑制多普勒频移, 恢复基带信号^[2]。载波捕获跟踪技术能够在多普勒频移下辅助信号恢复, 但多普勒频移同时也影响着载波同步的效果。多普勒频移越大, 载波捕获跟踪时间越长; 多普勒频移变化越快, 捕获跟踪性能越差^[3-5]。因此, 需要对高动态运动环境下的多普勒频移变化趋势进行描述, 并以此为依据实时调整载波同步方案, 有效地完成信号恢复。

以往的研究大多针对高动态载体与卫星之间的相对移动进行^[6-7], 很少涉及临近空间环境下的多普勒频移描述。本文基于以往的研究成果, 对高动态载体相对于临近空间接收平台的多普勒频移变化趋势进行了描述和仿真, 并在此基础上分析了多普勒频移对载波捕获跟踪产生的影响。

2 高动态运动模型下的多普勒频移

为描述高动态运动下的多普勒频移变化曲线, 首先需要建立三维坐标系, 模拟载体的运动空间, 以此为依据来描述载体的位移、速度等参数。本文以处于临近空间中的高空平台作为坐标原点建立三维坐标系, 以高动态载体与空间平台的相对位置作为高动态载体的位置矢量, 正北方为 x 轴, 正东方为 y 轴, z 轴垂直于地面。设 V 为速度矢量, θ 为速度矢量与位置矢量之间的夹角, β 为仰角, α 为方位角, 某一点目标 T 相对原点的位置和速度矢量分别为 $T = (T_x, T_y, T_z)$ 和

$V = (V_x, V_y, V_z)$, 则建立的三维坐标系如图 1 所示。

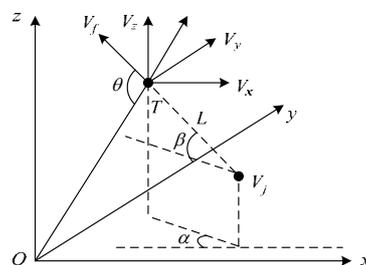


图 1 三维坐标系

根据空间解析几何可知, 速度矢量 V 与空间矢量 T 的夹角余弦为:

$$\cos \theta = \frac{V_x T_x + V_y T_y + V_z T_z}{\sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2} \cdot \sqrt{T_x^2 + T_y^2 + T_z^2}} \quad (1)$$

V 在 T 方向上的投影就是引起多普勒频移的目标相对于接收机天线的径向速度 v , 即:

$$v = |V| \cos \theta = \frac{V_x T_x + V_y T_y + V_z T_z}{\sqrt{T_x^2 + T_y^2 + T_z^2}} \quad (2)$$

根据目标运动模型即可求出出点目标的多普勒频移:

$$f_d = \frac{|V| \cos \theta}{\lambda} \quad (3)$$

基金项目: 国家自然科学基金资助重点项目“空天地一体化信息网络的基础理论及关键技术研究”(60532030)

作者简介: 仲伟志(1980 -), 女, 博士, 主研方向: 卫星通信, 扩频通信; 郭庆, 教授、博士生导师

收稿日期: 2010-03-30 **E-mail:** z_wei zhi3000@126.com

由式(3)可知,根据不同的运动方式可求解出运动载体相对于接收机产生的多普勒频移,以此来辅助载波捕获跟踪。

本文以匀速直线、匀变速直线、匀速圆周以及匀变速圆周 4 种基本运动方式为例来描述基本运动模型下的多普勒频移变化曲线。

(1)高动态载体做匀速直线运动

高动态载体由初始位置 x_0 匀速运动到终止位置 x_1 ,运动模型表达式为:

$$d = x_1 - x_0 = |V| \cos \theta \cdot \Delta t \quad (4)$$

在仿真过程中,以临近空间平台作为坐标原点,高动态载体在空间平台以下的空域进行高速飞行。载体初始时刻速度矢量的方位角在 $0 \sim 2$ 之间选择,仰角在 $0 \sim 0.5$ 之间选择。为便于仿真,将时间间隔取为 0.5 s 。由式(2)和式(3)可得载体相对于接收机的多普勒频移曲线,如图 2 所示。在匀速直线运动中,由于运动速率不变,多普勒频移的变化趋势只与高动态载体所处的位置信息密切相关,即多普勒频移随着速度矢量和载体位置矢量之间的夹角变化。

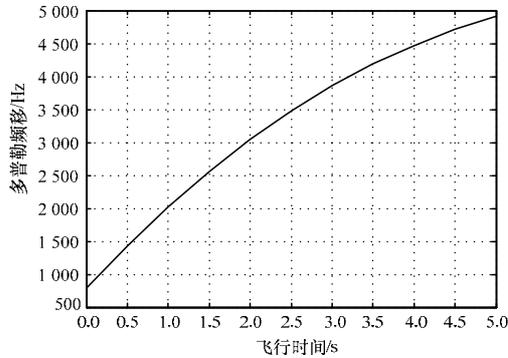


图 2 匀速直线运动轨迹下的多普勒频移变化

(2)高动态载体做匀变速直线运动

匀变速直线运动位移与速度的关系表达式如下:

$$d = V_0 \Delta t + a \Delta t^2 / 2 = |V_0| \cos \theta \cdot \Delta t + a \Delta t^2 / 2 \quad (5)$$

其中, a 为加速度。

匀变速直线运动仿真以匀加速直线运动为例,接收设备、载波、高动态载体的初始运动状态与匀速直线运动中的条件相同。载体相对于接收机的多普勒频移由式(2)和式(3)得到,仿真曲线如图 3 所示。从中可以看出,在匀加速直线运动中,运动轨迹沿直线变化,由于载体速度增大,速度矢量与未知矢量之间的夹角也在变化,因此在相同的时间段内多普勒频移的变化范围比匀速直线运动大,变化也更快。

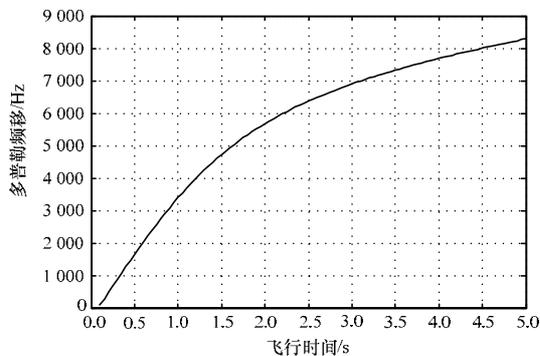


图 3 匀变速直线运动轨迹下的多普勒频移变化

若载体的速度非均匀变化,则高动态载体运动方向不变,即载体的仰角和方位角不变,速率根据实际情况随机改变。

此时,多普勒频移随速度大小、速度矢量与位置矢量之间夹角的变化而变化,因此,多普勒频移的变化也呈随机性。

(3)高动态载体做匀速圆周运动

匀速圆周运动的轨迹关系表达式如下:

$$d = v \cdot \Delta t = \omega \cdot r \cdot \Delta t \quad (6)$$

其中, r 为运动圆周半径。由式(2)和式(3)可求得载体相对于临近空间平台产生的多普勒频移轨迹,如图 4 所示。

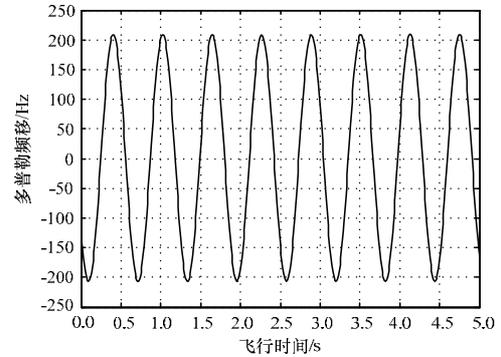


图 4 匀速圆周运动中多普勒频移的变化曲线

高动态载体飞行空域、坐标位置、载波频率等初始条件与前面相同。当高动态载体在某一确定平面(实验中假定在某一平行于 x, y 平面的水平面内)内做匀速圆周运动时,方位角匀速变化,即角速率不变,运动速率不变,但速度方向改变。本次仿真中 $r = 100 \text{ m}$ (为了显示多普勒频移变化曲线的变化特点而将运动半径取小,实际情况下圆周半径应该更大一些)。仿真结果表明,匀速圆周运动中的多普勒频移变化近似为正弦曲线。曲线变化的幅度与圆周运动的半径以及速率密切相关。当速率不变时, r 越大,曲线振荡越慢。

(4)高动态载体做匀变速圆周运动

当高动态载体在某一确定平面(实验中假定在某一平行于 x, y 平面的水平面内)内做匀变速圆周运动时,方位角变化的角速度均匀增加,速率增加,速度方向改变。为了方便说明,以匀加速圆周运动为例, $\omega = v/r$ 为角速率, r 为运动圆周半径,本次实验中 r 取 100 m ,匀速圆周运动的多普勒频移变化曲线如图 5 所示,多普勒频移呈振荡幅度增大的正弦曲线。多普勒频移曲线近似于正弦曲线是因为高动态载体在做圆周运动,多普勒频移变化曲线有振幅增大的趋势是由于在匀加速圆周运动中,运动半径不变时速率是增加的。如果飞行器做匀减速圆周运动,则多普勒频移的变化曲线呈振荡幅度减小的正弦曲线。

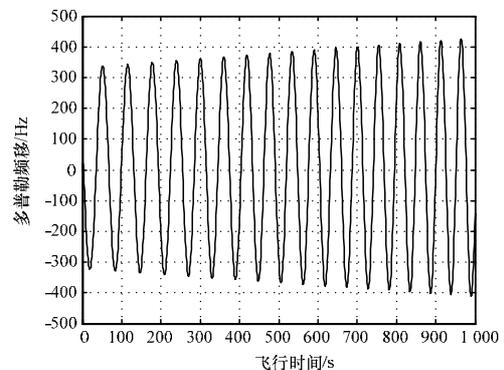


图 5 匀变速圆周运动中多普勒频移的变化曲线

由以上仿真结果可见,不同的高动态运动轨迹会产生不同的多普勒频移变化曲线。因此,可以由多普勒频移的变化

曲线来调整载波捕获中的参数,使捕获跟踪性能得到提高。

3 多普勒频移对载波捕获跟踪产生的影响

载波同步能够在多普勒频移下辅助信号恢复,但多普勒频移同时影响着载波同步的效果。下面以一个固定的多普勒频移的运动方式为例,说明多普勒频移对载波同步的影响。采用点叉积鉴频器进行频率捕获,其工作原理如图 6 所示^[8]。

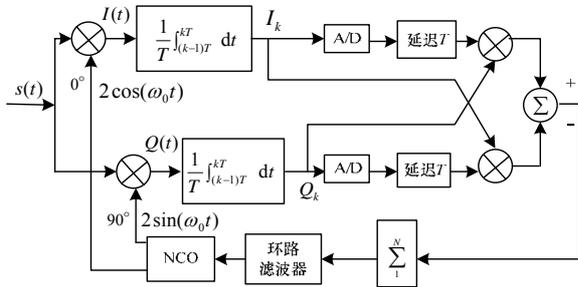


图 6 点叉积鉴频器的工作原理框图

假设输入信号为:

$$s(t) = d(t) \cdot \cos(\omega_0 t + f_d t + \varphi) \quad (7)$$

NCO 产生的信号为:

$$S_{VCO}(t) = 2\cos(\omega_0 t) \quad (8)$$

经过 $\pi/2$ 翻转后为:

$$S'_{VCO}(t) = 2\sin(\omega_0 t) \quad (9)$$

其中,系数设为 2 是为了计算方便。

2 路信号相乘后得:

$$I(t) = d(t) \cdot \cos(\omega_0 t + f_d t + \varphi) 2\cos(\omega_0 t) = d(t) \cdot [\cos(2\omega_0 t + f_d t + \varphi) + \cos(f_d t + \varphi)] \quad (10)$$

$$Q(t) = d(t) \cdot \cos(\omega_0 t + f_d t + \varphi) 2\sin(\omega_0 t) = d(t) \cdot [\sin(2\omega_0 t + f_d t + \varphi) + \sin(f_d t + \varphi)] \quad (11)$$

由式(10)、式(11)可见,影响点叉积鉴频器输出误差的主要因素是多普勒频移,高动态环境下运动体使载波产生较大

的多普勒频移和频率变化率,此时,多普勒频移常常会超出锁相环的捕获带,不能保证对载波的可靠捕获和跟踪。因此,为了更好地进行捕获跟踪,需要根据多普勒频移情况动态调整捕获跟踪方案。

4 结束语

多普勒频移是影响高动态链路载波捕获跟踪效果的主要因素,当多普勒频移范围超出鉴频器的捕获带或多普勒频移变化过快时,会造成环路失锁,导致不能进行有效的捕获跟踪,使基带信号无法恢复。本文以高动态载体在临近空间中的各种简单运动模型为依据,对高动态载体相对于临近空间平台的多普勒频移变化曲线进行描述和仿真,通过这些变化曲线,可动态调整链路捕获跟踪方案,加快捕获跟踪时间,提高载波捕获范围和载波跟踪精度,为进行有效的基带信号恢复提供保障。

参考文献

- [1] 曹秀云. 近空间飞行器成为各国近期研究的热点(上)[J]. 中国航天, 2006, (6): 32-36.
- [2] 田日才. 扩频通信[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.
- [3] Castell R F. An Adaptive Two Dimensional Kalman Tracking Filter[J]. IEEE Trans. on AES, 1980, 16(6): 822-829.
- [4] 王晓湘. 高动态多普勒频移的最大似然估计器[J]. 北京邮电大学学报, 2000, 23(1): 61-65.
- [5] 黄 振 陆建华. 卫星通信中多普勒频移的快速捕获[J]. 电子学报, 2003, 31(7): 1052-1055.
- [6] Hurd W J, Statman J I, Vilnrotter V A. High Dynamics GPS Receiver Using Maximum Like Hood Estimation and Frequency Tracking[J]. IEEE Trans. on AES, 1987, 23(5): 425-437.
- [7] 陈斌杰, 陈敏锋. 高动态下 GPS 信号的捕获和跟踪技术研究[J]. 现代电子技术, 2006, (3): 13-15.
- [8] 曾满红, 冯 明. 高动态多普勒条件下载波的捕获与跟踪算法研究[J]. 无线电技术, 2006, (1): 50-55.

编辑 张 帆

(上接第 21 页)

问,拓展了 BFM 的功能。该 BFM 被用于一款 SoC 的设计中,通过对 SoC 总线地址空间的扫描访问,很快发现了某个外围 IP 的协议不兼容问题,而且随机产生的访问流量能够作为 SoC 互连架构探索的激励,为该 SoC 互连部分的架构验证提供了方法。本文方法对处理器 IP 核的运算和通信进行了解耦,大大简化了 SoC 验证难度,可以无缝地集成到现有的 SoC 流程中。

6 结束语

本文针对处理器 IP 核仿真模型,提出了一种基于 SimpleScalar 的处理器 IP 核行为模型实现方法和一种基于可控随机事件驱动的 BFM 实现架构,为 SoC 开发提供了灵活的主动事件驱动接口,能加快 SoC 互连的验证工作。未来将对内核行为模型进行访存优化,进一步提高内核模型的准确性,并研究将 2 个模型融合起来形成一个整体 IP 模型的方法。

参考文献

- [1] Biggs J, Gibbons A. Reference Methodology for Enabling Core Based Design[Z]. European Synopsys User Group, 2002.
- [2] 胡伟武, 唐志敏. 龙芯 1 号处理器结构设计[J]. 计算机学报, 2003, 26(4): 385-394.
- [3] Austin T, Larson E, Ernst D. SimpleScalar: An Infrastructure System Modeling[J]. IEEE Computer, 2002, 35(2): 59-67.
- [4] Wunderlich R E, Wenisch T F, Falsafi B, et al. SMARTS: Accelerating Micro-architecture Simulation via Rigorous Statistical Sampling[C]//Proc. of the 30th Annual International Symposium on Computer Architecture. [S. l.]: ACM Press, 2003.
- [5] ARM Co., Ltd.. AMBA Specification(Rev 2.0)[Z]. 1999.
- [6] Desikan R, Burger D, Keckler S W. Measuring Experimental Error in Microprocessor Simulation[C]//Proc of the 28th Annual International Symposium on Computer Architecture. Toronto, Canada: [s. n.], 2001.

编辑 张 帆