

# 一种用于空间分集信号合成的时差消除方法

高超垒,宋振宇,战勇杰

(北京卫星信息工程研究所,北京 100086)

**摘要:**文中针对分别接收两路相同的卫星信号并对其进行合成的问题,提出了一种适用于高数据速率卫星通信的空间分集信号合成方法。它采用离散傅里叶变换的方法,将时域中的积分运算转化为频域的乘积运算,再通过傅里叶反变换求出其最大值和最大值的位置,实现了时差的估计。仿真结果表明,通过该时差消除方法获得的合成效果,与理论值相比存在 0.3dB 的损失,但系统仍能在信噪比是 3dB 的条件下正常工作。该时差消除方法可应用于高数据速率的 X 频段卫星通信中。

**关键词:**时差估计;互相关算法;内插滤波器;空间分集;信号合成

中图分类号:TN911.23

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2013)05-0014-03

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2013.05.004

## Method of Time Delay Elimination for Space Diversity Signal Combination

GAO Chao-lei, SONG Zhen-yu, ZHAN Yong-jie

(Beijing Institute of Satellite Information Engineering, Beijing 100086, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of respectively receiving two way the same satellite signal and carrying on the synthesis, propose a method of time delay elimination for space diversity signal combination which could be applied in satellite communication with high data rate. By DFT method, transfer integration of time-domain into product of frequency-domain, again through IDFT find out the maximum value and the location of the maximum, realizing the time-delay estimation. The simulation results show that, by the time difference method for eliminating obtain the synthesis effect, compared with the theoretical value has 0.3dB loss there, but the system can still work under the condition of the signal-to-noise ratio is 3dB. This method can be applied to high data rate X band satellite communications

**Key words:** time-delay estimation; cross-correlation algorithm; interpolator; space diversity; signal combination

## 0 引言

时差估计技术是宽带空间分集信号合成技术中的关键技术,准确地估计信号时差,消除信号间的时差是空间分集成合技术的关键。

时差估计主要指利用信号处理的理论和方法对不同接收器所接收信号的时间差进行估计,来确定其它相关参量,如信源的距离、方位、速度和移动方向等。时差估计在超声测距、声纳、雷达、地震、生物医学等领域有广泛应用。

目前时差估计方法主要有:互相关法<sup>[1]</sup>、自适应滤波法、基于高阶统计量法和基于小波变换法等<sup>[2-7]</sup>。互相关法是通过信号的互相关函数滞后的峰值估计信

号之间延迟的时间差,这种方法简单,容易实现,但它要求信号和噪声、噪声和噪声互不相关,但广义相关法需要信号与噪声的先验知识,且只能估计整数倍时差值。B. Widrow 提出的自适应时差估计算法<sup>[8]</sup>,不需要获得信号和噪声的统计先验知识,通过调整自身参数,可以跟踪时变的时差,但当滤波器阶数高时,存在计算量大、收敛速度慢等缺点。基于高阶统计量时差估计方法<sup>[9]</sup>是利用高阶统计量处理接收信号,有效抑制高斯和非高斯有色噪声的影响而提高信噪比,在相关噪声条件下有着较好的时差估计性能,但该方法需要更长的数据长度和更大的计算量。

文中将针对信号时差消除方法进行分析并提出一种用于宽带空间集信号合成的时差消除方法,消除整数倍时差值和小数倍时差值,并对其进行仿真验证。

## 1 时差估计方法

假设两个天线接收到的信号存在不同的延迟。此

收稿日期:2012-08-11;修回日期:2012-11-20

基金项目:国家“863”高技术发展计划项目(2009AA12Z149);高分辨率对地观测系统重大专项课题(GFZX04040203)

作者简介:高超垒(1987-),男,硕士研究生,研究方向为航天器通信技术。

研究首先对低通滤波的输出数据进行粗判决,得到两路信号的粗判决结果。由于粗判决中使用的采样位置不是最佳采样位置,因此粗判决的结果中存在较多的误码。然后对两路判决结果进行相关计算,通过相关来估计两路信号之间的整比特到达时差。对于模拟信号,两个随机过程  $x(t)$  和  $y(t)$  的互相关函数定义为<sup>[10]</sup>:

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t)y(t-\tau)dt \quad (1)$$

互相关函数是度量两个随机过程  $x(t)$  和  $y(t)$  间的相关性函数。如果两个随机过程发生且互相没有关系,互相关函数将是一个常数,等于两个随机函数的平均值的积。若其中一个平均值为 0,则互相关函数为 0。在时差估计中,假设信号模型为:

$$\begin{cases} x_1(t) = s(t) + n_1(t) \\ x_2(t) = s(t - D) + n_2(t) \end{cases} \quad -\frac{T}{2} < t < \frac{T}{2} \quad (2)$$

其中  $s(t)$  是信号,假设  $n_1(t)$ 、 $n_2(t)$  是互相独立的噪声过程。 $T$  是样本观察时间, $D$  是信号时延。将信号模型代入相关函数中可以得到以  $\tau$  为参数的相关函数:

$$\begin{aligned} R_{x_1x_2}(\tau) &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x_1(t)x_2(t-\tau)dt = \\ \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T [s(t) + n_1(t)][s(t-D-\tau) + \\ n_2(t-\tau)]dt &= R_{ss}(\tau + D) + R_{sn_2}(\tau) + \\ R_{n_1s}(\tau + D) + R_{n_1n_2}(\tau) \end{aligned} \quad (3)$$

假设噪声与信号是互不相关的,信号与噪声的平均值为 0,根据相关函数的性质,有  $R_{sn_2}(\tau) = 0$ 、 $R_{n_1s}(\tau + D) = 0$ ,则有:

$$R_{x_1x_2}(\tau) = R_{ss}(\tau + D) + R_{n_1n_2}(\tau) \quad (4)$$

由上式可知,当  $\tau$  不大时,噪声在时间轴上是部分相关的,而随着  $\tau$  的增大,  $R_{n_1n_2}(\tau) \rightarrow 0$ ,这样  $R_{ss}(\tau + D)$  就会突出。当  $\tau = D$  时,  $R_{x_1x_2}(\tau)$  有最大值。通过寻找  $R_{x_1x_2}(\tau)$  最大值出现的时刻就可以估计出时延  $D$ 。

在本方法中,两路数据的时延误差采用数据间的自相关特性得到,即当两路数据完全对齐时,其相关计算得到的结果最大,否则其相关计算得到的结果较小。由于时域信号的卷积运算等效频域的乘法运算,时延误差检测的实现原理框图如图 1 所示。

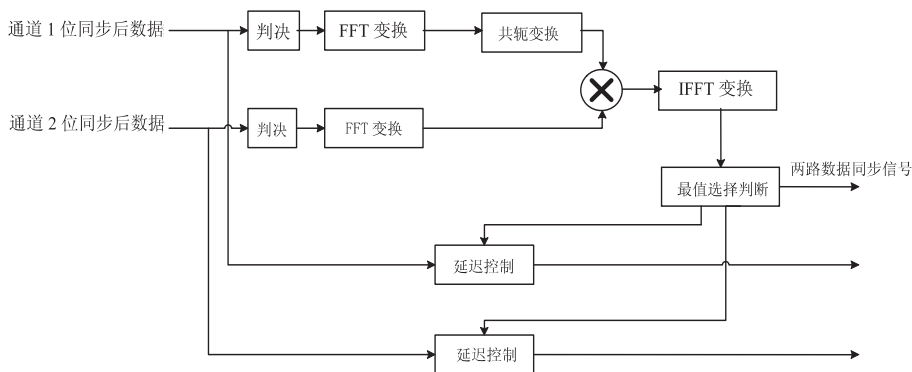


图1 时延误差检测实现原理框图

两通道位同步后数据经判决后,通过 FFT 变换转换到频域。通道 1 的频域数据进行共轭变换后与通道 2 的频域数据进行相乘,相乘结果再通过 FFT 逆变换变换到时域。通过这样的变化处理,实现了两路数据的相关运算,简化了处理流程。

完成相关运算的数据,通过最值选择判断模块得到 2 路数据的时延误差,分别控制 2 路延迟控制模块,实现 2 路数据的时差消除。

## 2 小数倍时差的消除方法

经过互相关运算的两路信号已经消除了整数比特的时间延迟,但两路信号的采样位置并不是最佳采样点。因此还需要分别将两路信号的采样位置调整至最佳采样点。通过内插环路后,对两路信号进行合成。

内插环路<sup>[11,12]</sup>的目的是为了实现信号的最佳采样,把两路数据处理到同样的相位点,消除两路数据在比特相位上的抖动。内插环路原理结构框图如图 2 所示。

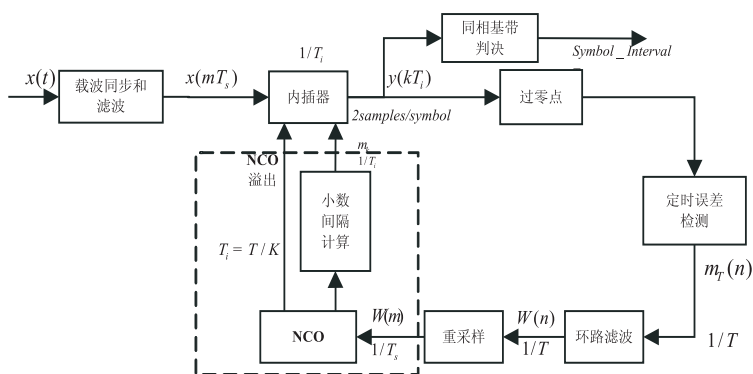


图2 内插环路原理结构框图

内插环路采用较常见的二阶环路锁相环路,环路中包括分数插值器、过零检测、定时误差检测、二阶环路滤波器、NCO,其中插值器则是立方分数插值器。

内插环路中控制相位的功能主要由线性递减 NCO 来实现,只相当于普通 NCO 的相位累加器部分,最后的小数间隔  $\alpha$  用简单的相似三角形方法就能求

出。它的运算步骤如下:整个估值器模块的工作时钟为输入的采样时钟  $T_s$ , 当在第  $m$  个采样时刻到来时, NCO 的状态寄存器中的值为  $\eta(m)$ , 递减控制字为  $W(m)$ , 为便于计算, 假设 NCO 是归一化的,  $W(m)$  为一个正的小数, NCO 会产生下溢, 根据 NCO 的递减工作特性可推得:

$$\eta(m) = (\eta(m-1) - W(m)) \bmod -1 \quad (5)$$

$W(m)$  可以决定 NCO 的递减计数周期, 而该周期也正是再采样的时间间隔  $T_s$ 。因为每个  $T_s$  时间 NCO 都会递减  $W(m)$ , 所以它会在平均每个  $1/W(m)$  个  $T_s$  后产生溢出, 因此:  $T_i = T_s/W(m)$ 。对于固定的抽取比例来说,  $T_s$  是个定值, 则  $W(m)$  也即为定值, 对于间隔  $\alpha$  的计算可用图 3 表示。

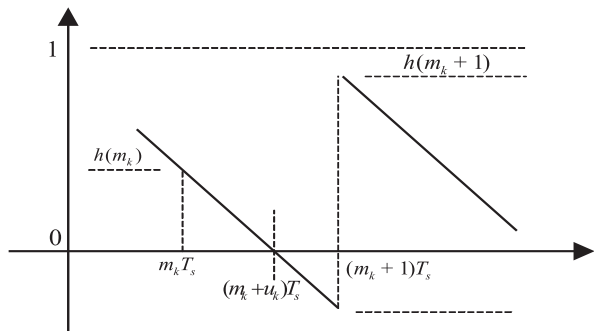


图3 NCO 操作过程及小数间隔计算示意图

图中假设在第  $m_k$  个  $T_s$  时刻, NCO 寄存器中的数值为  $\eta(m_k)$ , 在第  $m_k + 1$  个时刻, 寄存器中的数值为  $\eta(m_k + 1)$ 。根据前面的讨论可知, 第  $k$  个再采样的时刻为:  $kT_i = (m_k + u_k)T_s$ 。由此可采用相似三角形的方法计算得到:

$$u_k = \frac{\eta(m_k)}{W(m)} \quad (6)$$

插值滤波的小数间隔  $u_k$  是时变量, 根据立方内插, 可以得到内插时刻的幅度值。

### 3 仿真与验证

由于 2 路信号位同步后的数据信噪比较低, 存在较多的误码, 假设 2 路数据最大时延误差  $\pm 100\text{bit}$ , 因此两路数据相关的点数直接影响相关峰的高低。在本实现方法中等效进行 FFT 运算的点数。

按照信噪比  $-3\text{dB}$ , 两路数据时差相差  $100\text{bit}$  进行仿真分析, 采用 256 点、512 点、1024 点 FFT 运算, 在纯随机数据条件下, 得到的相关峰结果如图 4 所示。

通过上面的仿真结果可以看出, 当信噪比较低且两路信号延迟差较大时, 采用 256 点相关运算, 得到的相关峰已经很不明显, 对信号延迟的准确判决会造成很大的影响。当把相关点数提升到 512 点和 1024 点时, 两路信号的相关峰已经比较明显了, 可以比较准确

地判决出两路信号延迟。

同时考虑实现的资源占用和相关运算的时间, 在本方案中采用 512 点的相关运算实现时差误差的检测。至此, 整数倍的时差即可消除。

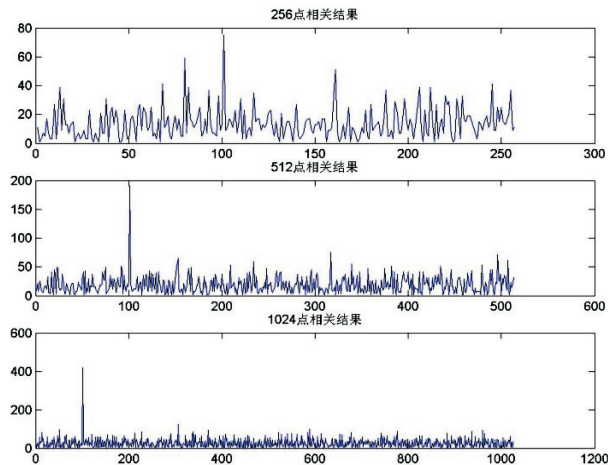


图4 相关运算仿真分析结果

考虑两路信号是等增益合成, 现将存在时差的两路信号, 经过内插环路后合成进行仿真, 采样率为  $2400\text{M}$ , 载波频率为  $720\text{M}$ , 信号调制方式为 QPSK, 数据速率为  $600\text{Mbps}$ , 采样点数为  $1000000$ 。在此条件下对载噪比  $E_b/N_0$  为  $0 \sim 10\text{dB}$  范围内进行仿真, 并与理想情况进行对比 (没有时差), 仿真结果如图 5 所示。

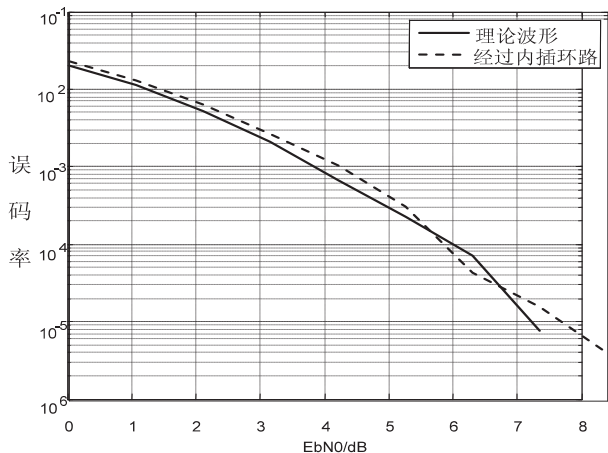


图5 经过内插环路后对信号合成的影响

由于仿真中 I 路和 Q 路码元的采样点数均为 8, 故相当于每路只有  $125000$  个码元, 从图中看误码率在  $10^{-3}$  以下已经不准确, 在误码率为  $10^{-3}$  时内插环路的损失为  $0.3\text{dB}$  左右, 系统在信噪比为  $3\text{dB}$  时已经可以工作。从仿真结果来看, 在信噪比达到  $3\text{dB}$  以上时, 该方法能够很好地消除两路信号的时差, 得到较好的合成增益。

### 4 结束语

文中提出了一种用于高速空间分集信号合成中时

5 结束语

为了解决现有中华文化 BBS 系统分别存在的使用中文、功能不完善、内容不全面的问题,文中采用信息系统开发的结构化方法,通过系统分析、系统设计和系统实现,开发了中华文化英文 BBS 系统。为外国人学习、交流中华文化提供了功能完善、内容全面的全英文互联网平台。

目前,系统已在实验室局域网环境下投入试运行,经过一段时间的功能和性能测试,以及英文翻译的继续完善后将被部署到租用的虚拟主机上投入正式运行。

参考文献:

[1] 马少龙. 中国传统文化网 BBS 子系统完善研究[D]. 北京: 北京交通大学,2011.

[2] 姚楠,陶琳. 基于 Web 模式的 BBS 信息系统设计[J]. 信息与电脑(理论版),2009(10):42-44.

[3] 华夏社区[EB/OL]. [2012-08-19]. <http://bbs.huaxiaculture.com/bbs>.

[4] 中国文化论坛[EB/OL]. [2012-08-19]. <http://www.wenhuaabbs.com/>.

[5] 艺术论坛[EB/OL]. [2012-08-19]. <http://bbs.artx.cn>.

[6] 甘仞初,颜志军,杜晖,等. 信息系统分析与设计[M]. 北京:高等教育出版社,2003.

[7] Fredrik K,Par J. Towards structured flexibility in information systems development:Devising a method for method configuration[J]. Journal of Database Management,2009,20(3):51-75.

(上接第 16 页)

差消除的实现方法,对时差估计的精度高、估计门限低,且能适应 600Mbps 的数据速率。仿真结果表明经过内插环路后对信号合成时与理论值相比存在 0.3dB 左右的损失,但仍能满足空间分集合成系统的要求。下一步可通过优化内插环路中定时误差估计算法,提高误差估计的精度,来进一步提高小数倍时差的估计精度。该时差消除方法可用于高数据速率的 X 频段卫星通信系统中。

参考文献:

[1] Knapp C H,Cartar G C. The generalized correlation method for estimation of time delay[J]. IEEE Transactions on Acoustics,Speech,and Signal Processing,1976,24(4):320-327.

[2] 邱天爽,王宏禹. 二次加窗 LMS 自适应时间延迟估计[J]. 电子科学学刊,1994(6):569-575.

[3] 邱天爽,王宏禹. 一种 HB 加权的自适应时延估计器[J]. 电子科学学刊,1996(9):549-552.

[4] 束锋. 对时延算法的改进[J]. 通信对抗,1998(3):20-

[8] 程林. 基于 ASP 与 Access 技术开发 BBS 系统[J]. 电脑编程技巧与维护,2010(14):80-82.

[9] Katsuhiko Y,Koji K,Hirofumi D. Component-oriented development method and environment for advanced enterprise information systems[J]. Hitachi Review,1998,47(6):256-262.

[10] Jeebbs[EB/OL]. [2012-08-19]. <http://bbs.jeecms.com/>.

[11] YxBBS[EB/OL]. [2012-08-19]. <http://www.yimxu.com/bbs/>.

[12] Simple Machines Forum BBS[EB/OL]. [2012-08-19]. <http://www.splemachines.org/>.

[13] 百度百科. 中国传统文化[EB/OL]. [2012-08-19]. <http://baike.baidu.com/view/40254.htm>.

[14] 曹晓宏. 中国传统文化指要[M]. 成都:四川出版集团,2001.

[15] 殷岳. 中华传统文化精要普及读本[M]. 北京:北京工业大学出版社,2007.

[16] 陈文华. 中国传统文化概观[M]. 上海:上海文艺出版社,2001.

[17] 田季生,贺润坤. 中国传统文化概观[M]. 北京:科学出版社,2009.

[18] 陈东影. 如何用 ASP 构建动态网页[J]. 黑龙江水利科技,2009(2):74-75.

[19] 周媛. 浅谈 Access 数据库和 VFP 数据库[J]. 商情,2011(13):122-122.

[20] 丁晓萍. 基于 ASP 技术 BBS 系统设计方案探讨[J]. 河北能源职业技术学院学报,2011(1):65-66.

[21] Chen X,Kendal S,Potts I,et al. Towards an integrated method for hybrid information system development[J]. Software Engineering,1997,144(5):261-269.

23.

[5] 陈华伟,赵俊渭,郭业才. 二次加权频域自适应时延估计算法与应用[J]. 声学学报,2003,28(1):61-65.

[6] 王宏禹,邱天爽. 自适应噪声抵消与时间延迟估计[M]. 大连:大连理工大学出版社,1999.

[7] 何正权,何旭. 多次采样与希尔伯特变换[J]. 电子科技大学学报,1997,26(5):504-510.

[8] Widrow B,Steam S D. Adaptive signal processing[M]. Englewood Cliffs;Prentice-Hall,Inc.,1993.

[9] 张贤达. 时间序列分析-高阶统计量方法[M]. 北京:清华大学出版社,1996.

[10] 王宏属. 随机信号处理[M]. 北京:科学出版社,1988.

[11] Gardner F M. Interpolation in Digital Modems-Part I: Fundamentals[J]. IEEE Transaction on Communication,1993,41(3):501-507.

[12] Erup L,Gardner F M,Harris R A. Interpolation in Digital Modems-Part II: Implementation and Performance[J]. IEEE Transaction on Communication,1993,41(6):998-1008.

# 一种用于空间分集信号合成的时差消除方法

作者: [高超垒](#), [宋振宇](#), [战勇杰](#)  
作者单位: [北京卫星信息工程研究所, 北京 100086](#)  
刊名: [计算机技术与发展](#)  
英文刊名: [Computer Technology and Development](#)  
年, 卷(期): 2013(5)

本文链接: [http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_wjfz201305006.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_wjfz201305006.aspx)