

## 一种抗频偏的时间精同步方法及性能分析

王磊\* 徐大专

(南京航空航天大学信息科学与技术学院 南京 210016)

**摘要:** 该文导出了互相关时间精同步的性能随频率偏移和信噪比变化的表达式,并提出一种受频偏影响较小的精同步方法。该文对同步性能表达式进行分析,得到在某一频偏下同步序列长度的上限值。新方法将同步序列分段,每段和接收信号分别作互相关,将各段的相关值延时相加作为同步的度量。通过仿真将新方法和其它时间同步方法进行了对比。仿真结果表明,新方法可以大大提高系统抗频偏的能力。

**关键词:** 无线通信; 时间同步; 互相关; 频率偏移

**中图分类号:** TN92

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2011)02-0300-04

**DOI:** 10.3724/SP.J.1146.2010.00346

## An Anti Frequency Offset Fine Time Synchronization Method and Its Performance Analysis

Wang Lei Xu Da-zhuan

(School of Information Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** This paper analyzes the performance of fine time synchronization which using cross correlation method and gives the relationship between its performance and the parameters of carrier frequency offset and signal to noise ratio. Then this paper proposal a new fine time synchronization method which is less affected by frequency offset. This paper gives the upper limit for synchronization sequence length in a certain frequency offset. In new method, synchronization sequence is split into several parts and correlates with receive signal separately. The delayed correlation values for every segment are added to get the synchronization metric. The simulation results demonstrate that the performance of the new method is robust against frequency offset.

**Key words:** Wireless communication; Time synchronization; Cross-correlation; Frequency offset

### 1 引言

常用的时间同步方法主要有两种,一种利用接收信号自身的相关性,将接收信号和其自身的延时作相关,本文将这类同步方法称为自相关同步。自相关同步的同步序列中存在两段或多段相同的部分<sup>[1,2]</sup>,在OFDM系统中利用循环前缀来完成同步也属于这一类方法<sup>[3,4]</sup>。自相关同步不受频率偏移的影响,但其同步度量曲线变化缓慢,同步位置不精确,且由于参与相关运算的两段信号都叠加了噪声,自相关同步受噪声影响较大,一般只能用来完成时间的粗同步<sup>[5,6]</sup>。另一类同步方法是将接收信号和本地序列作互相关进行同步<sup>[7,8]</sup>,本文将其称为互相关同步。互相关同步的度量曲线尖锐,因此同步精度很高,且由于本地序列不会受噪声影响,其抗噪声性能较好。互相关同步一般用来作精同步,但其性

能对频率偏移非常敏感,频率偏移达到一定门限会导致性能急剧下降。因此只能在频偏很小的情况使用<sup>[9]</sup>。

本文首先给出互相关同步的性能随频偏、序列长度和信噪比变化的表达式,并给出在某一频偏下同步序列长度的上限值,并由此提出一种能对抗频偏的互相关同步方法。新同步方法克服了传统方法不能对抗频偏的缺点并对同步精度没有很大影响。最后本文对新方法的性能进行了分析和仿真。

### 2 互相关同步性能分析

互相关同步将接收信号和本地同步序列的互相关曲线作为同步度量曲线,度量曲线的峰值指示了信号的起始位置。度量曲线峰值越大,正确同步的概率越大,峰值外的其余度量值越小,误同步的概率越小。因此两者差异越大,同步性能越好。

设发送信号为 $x(i)$ ,接收信号为 $y(i)$ , $x(i)$ 的前 $L$ 点为同步序列 $c(i)$ 。设归一化的角频率偏移 $\Delta\omega = 2\pi\Delta f/f_s$ , $f_s$ 为采样率, $\Delta f$ 为频率偏移,初始相位偏移为 $\phi$ ,则

2010-04-06 收到, 2010-07-15 改回

航空科学基金(2009ZC52036)资助课题

\*通信作者: 王磊 wanglei\_1982@nuaa.edu.cn

$$y(i) = x(i)e^{j(\Delta\omega i + \phi)} + n(i) \quad (1)$$

其中  $n(i)$  表示高斯白噪声，设信号功率为  $P_s = E\{|x(i)|^2\}$ ，噪声功率为  $P_n = E\{|n(i)|^2\}$ ，

互相关曲线  $p(d)$  为

$$p(d) = \sum_{i=0}^{L-1} y(d+i)c^*(i) \quad (2)$$

将  $p(d)$  的模平方归一化后得到度量曲线  $\rho(d)$ 。归一化通过除以接收信号能量  $E_y$  和同步序列能量  $E_c$  来完成， $E_y = L(P_s + P_n)$ ， $E_c = LP_s$

$$\rho(d) = \frac{|p(d)|^2}{E_y E_c} = \frac{|p(d)|^2}{L^2(P_s + P_n)P_s} \quad (3)$$

接收端根据  $\rho(d)$  的峰值来判断信号的起始位置。由于假设  $x(i)$  的前  $L$  点为同步序列  $c(i)$ ，因此  $\rho(0)$  为度量曲线的峰值，令  $A_1 = \rho(0)$ ，并用  $A_2$  代表其它度量值，两者的差异决定了同步的性能。由于  $A_1, A_2$  均为随机变量，因此用  $A_1, A_2$  期望的比值  $E\{A_1\}/E\{A_2\}$  来分析同步的性能，比值越大，则漏同步和误同步的概率越小，同步的可靠性越高。式(4)给出了  $E\{A_1\}/E\{A_2\}$  随序列长度  $L$ ，频偏和信噪比  $\gamma$  变换的表达式，式(4)的推导略。

$$\frac{E\{A_1\}}{E\{A_2\}} = \frac{\gamma}{L(\gamma + 1)} \left( \frac{\sin(L\Delta\omega/2)}{\sin(\Delta\omega/2)} \right)^2 + 1 \quad (4)$$

$\gamma = P_s/P_n$  为信噪比。分析式(4)可以发现，频偏对同步性能造成的影响主要体现在  $\frac{\sin(L\Delta\omega/2)}{\sin(\Delta\omega/2)}$  这一

项上，同步性能会随频偏和序列长度的乘积  $L\Delta\omega$  急剧减低。图 1 为在不同频偏下， $E\{A_1\}/E\{A_2\}$  随序列长度  $L$  的变化图，其中信噪比  $\gamma = 8$  dB。从图 1 中可以看出，同步性能仅在频偏为零的情况下会随着序列长度变大而线性提高。在频偏不为零的情况下，同步性能在达到最大值后振荡减小。

令

$$\frac{\partial(E\{A_1\}/E\{A_2\})}{\partial L} = 0 \quad (5)$$

其第 1 个解  $L_0$  即为使  $E\{A_1\}/E\{A_2\}$  取最大值的序列

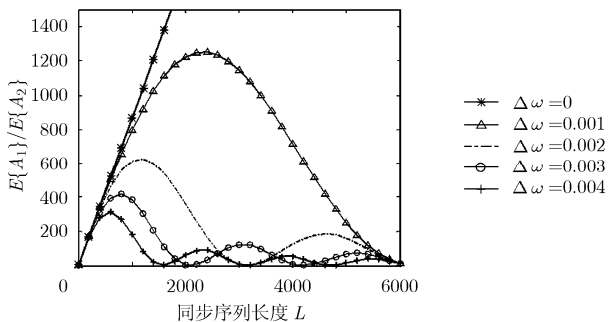


图 1 同步性能随  $L$  的变化图， $\gamma = 8$  dB

长度，解得  $L_0 = 2.3311/\Delta\omega$ 。因此在存在频偏的情况下，单个同步序列的长度不应大于  $2.3311/\Delta\omega$ ， $2.3311/\Delta\omega$  为同步序列长度的上限。

### 3 改进的互相关同步

由式(4)和图 1 可以看出，过长的同步序列在频偏的影响下会使互相关性消失。因此改进方法通过将同步序列分段来减小频偏的影响。分段后，每一小段同步序列单独和接收信号作互相关，再取其模平方的和作为度量曲线。只要每一段的长度都远小于  $2.3311/\Delta\omega$ ，同步性能可以基本不受频率偏移的影响。

设  $y(i)$  为接收序列， $c(i)$  为同步序列，同步序列的总长为  $L$ ，将其分为  $N$  段得到分段同步序列  $c_n(i)$ ，每段长为  $M = L/N$

$$c_n(i) = c(nM + i), n=0, \dots, N-1, i = 0, \dots, M-1 \quad (6)$$

先计算  $y(i)$  和  $c_n(i)$  的相关值  $p_n(d)$

$$p_n(d) = \sum_{i=0}^{M-1} y(d+i)c_n^*(i) \quad (7)$$

由于  $y(i)$  中分段同步序列  $c_n(i)$  的位置是依次排列的，因此  $|p_n(d)|^2$  的峰值位置也是依次出现的。将各段相关值以  $|p_{N-1}(d)|^2$  对齐，将  $|p_n(d)|^2$  延时不同长度然后相加得到  $|p(d)|^2$ 。

$$|p(d)|^2 = \sum_{n=0}^{N-1} |p_n(d - M(N - n - 1))|^2 \quad (8)$$

再将  $|p(d)|^2$  进行归一化后得到度量曲线  $\rho(d)$ 。

$$\rho(d) = \frac{|p(d)|^2}{E_s E_c} = \frac{|p(d)|^2}{L^2(P_s + P_n)P_s} \quad (9)$$

最后对  $\rho(d)$  进行峰值检测得到信号的起始位置。

改进方法的实现如图 2 所示。改进方法将每段本地同步序列单独和接收信号作相关。对于每个小段来说，由于相关长度变小，根据式(4)，其受频率偏移的影响也大大减小。

### 4 改进方法的性能分析

本节仍然从  $A_1$  和  $A_2$  的角度来分析改进方法的同步性能， $A_1$  和  $A_2$  的定义和第 2 节相同。首先写出对于改进方法其  $E\{A_1\}/E\{A_2\}$  的表达式，其中  $L$  为同步序列总长度， $N$  为分段的段数， $\gamma$  为信噪比，

$$\frac{E\{A_1\}}{E\{A_2\}} = \frac{N\gamma}{L(\gamma + 1)} \left( \frac{\sin(L\Delta\omega/2N)}{\sin(\Delta\omega/2)} \right)^2 + 1 \quad (10)$$

可以看出，频偏  $\Delta\omega$  造成的影响主要体现在  $\frac{\sin(L\Delta\omega/2N)}{\sin(\Delta\omega/2)}$  这一衰减项中，分段数  $N$  的变大可以

减小其衰减速度，因此分段同步方法可以减小频偏

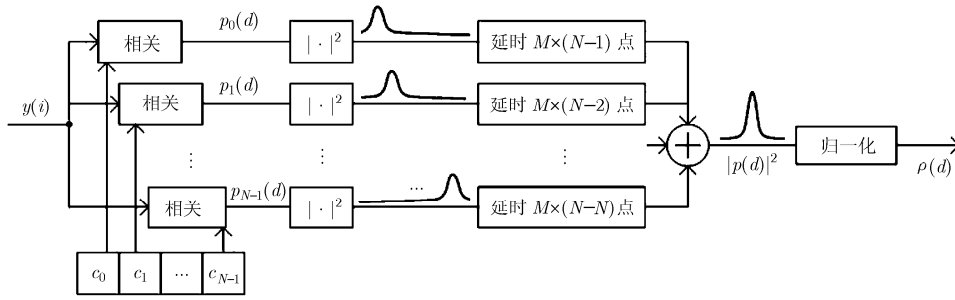


图 2 改进方法实现框图

造成的影响。

另外由于  $A_1$  和  $A_2$  都是随机变量，因此同步算法不仅希望  $E\{A_1\}/E\{A_2\}$  足够大，且希望  $A_1$  和  $A_2$  的取值能尽量稳定，即  $A_1$  和  $A_2$  的方差较小，以降低误同步概率。改进方法虽然能减小频偏造成的影响，但会导致  $A_1$  和  $A_2$  的方差略微变大。为了简化分析，仅考虑频偏为零时改进方法对  $A_1$  和  $A_2$  的方差的影响，式(9)，式(10)的推导略。

$$\text{var}\{A_1\} = \left( \frac{\gamma}{\gamma+1} \right)^2 \left( \frac{4+2/\gamma}{L} + \frac{N(10+10/\gamma+1/\gamma^2)}{L^2} + \frac{N^2(6+8/\gamma+5/2\gamma)}{L^3} \right) \quad (11)$$

$$\text{var}\{A_2\} = \frac{N}{L^2} + \frac{2N^2}{L^3} \quad (12)$$

其中  $N$  为分段的段数， $N=1$  即传统的互相关同步方法。根据式(11)，式(12)， $\text{var}\{A_1\}$  的后两项和  $\text{var}\{A_2\}$  会随着  $N$  变大而变大，但当同步序列长度  $L$  较大时，其影响可以忽略，因此改进方法适用于同步序列较长的情况。设信噪比  $\gamma=8$  dB，图 3，图 4 分别为  $\text{var}\{A_1\}$  和  $\text{var}\{A_2\}$  随序列长度  $L$  的变化情况。其中  $N=1$  即传统的互相关同步方法，可以看出当  $L$  较大时，由分段所造成的影响可忽略。

### 5 性能仿真

本文将改进的新互相关同步和传统的互相关同步以及自相关同步的性能进行了对比。同步序列长

为  $400 \mu\text{s}$ ，采样率为  $1 \text{ MSample/s}$ ，由 400 个采样点组成。新方法将同步序列分为 4 段( $N=4$ )进行同步。自相关同步方法中同步序列后  $200 \mu\text{s}$  为前  $200 \mu\text{s}$  的重复，利用同步序列前后的相关性进行同步。

图 5 和图 6 分别为在 高斯白噪声信道和瑞利衰落信道下，3 种同步方法得到的度量曲线  $\rho(d)$ 。信噪比为 3 dB，频偏为 1.5 kHz。衰落信道为 2 径瑞利信道，延时  $5 \mu\text{s}$ ，路径增益为 0, -3 dB，多普勒扩展 20 Hz。从图中可以看出自相关同步的度量曲线是缓慢变化的，由于没有尖锐的峰值，其同步位置不精确，且性能受噪声影响较大；传统的互相关同步方法虽然能得到尖锐的峰值，但由于受频偏的影响，其峰值很小。本文所提的分段互相关同步方法不仅能得到尖锐的峰值，且峰值受频偏的影响较小，性能优于前两种方法。

定义同步失败概率(FAP)以方便比较 3 种方法的同步性能，同步失败概率(FAP)定义为同步位置不正确的概率<sup>[10]</sup>。图 7 和图 8 分别为在 高斯白噪声信道和衰落信道下 3 种同步方式 FAP 随信噪比变化的性能。其中频率偏移为 6 kHz，同步门限设为 0.1，衰落信道参数和图 6 相同。图中，在频偏的影响下，传统互相关同步已不能正常工作。自相关同步完全正确的概率很低，因此自相关同步只适合于做粗同步，不适合做精同步，而本文所提的分段互相关同步有较高的精度。

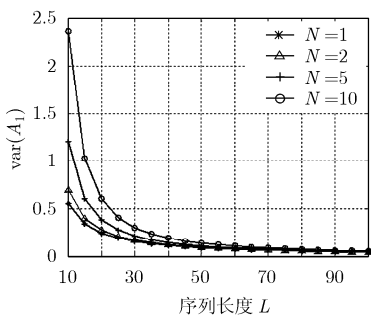


图 3 分段后  $\text{var}\{A_1\}$  变化

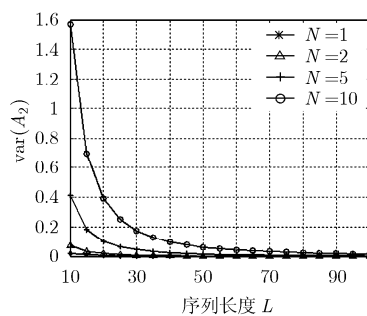


图 4 分段后  $\text{var}\{A_2\}$  变化

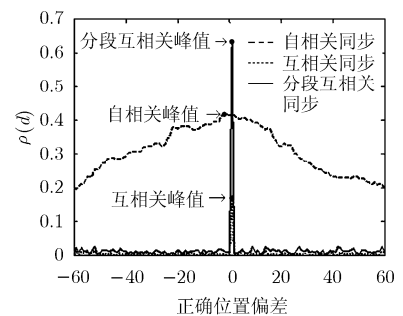


图 5 高斯白噪声信道下同步度量曲线  $\rho(d)$

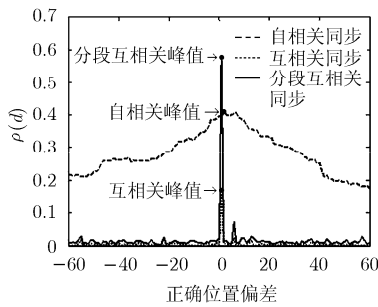
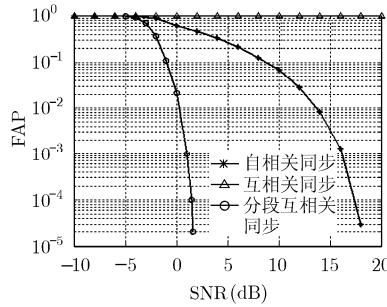
图6 衰落信道下同步度量曲线  $\rho(d)$ 

图7 高斯白噪声信道下 FAP 随信噪比的变化

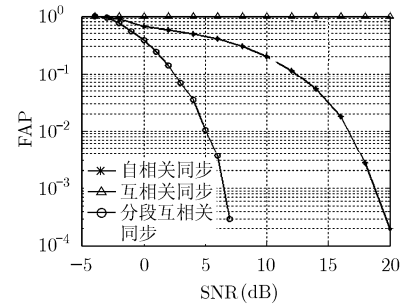


图8 衰落信道下 FAP 随信噪比的变化

图9和图10为分段互相关同步的抗频偏性能。信噪比为3 dB。分段的段数 $N$ 分别取1, 2, 4,  $N$ 取1表示不分段, 即传统的互相关同步。可以看出, 对于分段或不分段的互相关同步, 其抗频偏性能都存在门限, 当频偏超过这个门限时, 同步性能会急剧下降, 分段数 $N$ 越大, 频偏门限也越大, 因此分段可以提高抗频偏的性能。

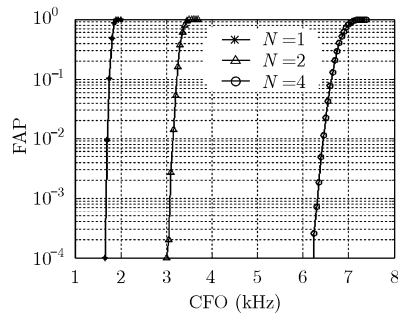


图9 高斯白噪声信道下 FAP 随频偏的变化

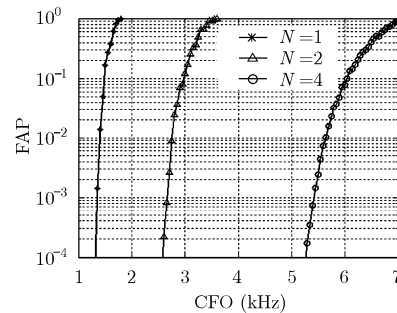


图10 衰落信道下 FAP 随频偏的变化

## 6 结束语

本文对频率偏移对互相关同步性能的影响进行了理论分析, 并提出了一种分段互相关同步方法。新方法不仅和传统的互相关同步一样, 可以得到尖锐的同步度量曲线, 抗噪声性能好, 而且克服了传统互相关同步受频率偏移影响大的缺点, 具有实用价值。

## 参考文献

- [1] Schmidl T and Cox D. Robust frequency and timing synchronization for OFDM [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1997, 45(12): 1613-1621.
- [2] 胡艳龙, 龚广伟, 范波等. 基于重复PN序列的NC-OFDM时间同步算法[J]. *通信对抗*, 2009, (1): 29-32.  
Hu Yan-long, Gong Guang-wei, and Fan Bo, *et al.*. Timing synchronization algorithm of NC-OFDM based on PN repeated sequences [J]. *Communication Countermeasures*, 2009, (1): 29-32.
- [3] Van de Beek J J, Sandell M, and Borjesson P O. ML estimation of time and frequency offset in OFDM systems [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1997, 45(7): 1800-1805.
- [4] 罗仁泽, 高嶂, 伍裕江等. 保护带叠加最佳训练序列时间同步方法 [J]. *电子学报*, 2009, 37(7): 1584-1587.  
Luo Ren-ze, Gao Di, and Wu Yu-jiang, *et al.*. Timing synchronization scheme using superimposed perfect training in guard band [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2009, 37(7): 1584-1587.
- [5] Yang B G, Letaief K, and Cheng R, *et al.*. Timing recovery for OFDM transmission [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2000, 18(11): 2278-2291.
- [6] Ruan M, Shi Z N, and Reed M. Training symbol based coarse timing synchronization in OFDM systems [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2009, 8(5): 2558-2569.
- [7] Speth M, Classen F, and Meyr H. Frame synchronization of OFDM systems in frequency selective fading channels [C]. *IEEE 47th in Vehicular Technology Conference*, Phoenix, USA, 1997, 3: 1807-1811.
- [8] Almuzaini K K and Gulliver T A. A New Time Synchronization Technique for OFDM Systems [C]. *IEEE 68th in Vehicular Technology Conference*, Calgary, Canada, 2008: 1-5.
- [9] Speth M, Fechtel S, and Fock G, *et al.*. Optimum receiver design for OFDM-based broadband transmission-part II: A case study [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2001, 49(4): 571-578.
- [10] Tang Shi-gang, Peng Ke-wu, and Gong Ke, *et al.*. Robust Frame Synchronization for Chinese DTTB System [J]. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 2008, 54(1): 152-158.

王 磊: 男, 1982年生, 博士生, 研究方向为无线通信与通信信号处理。

徐大专: 男, 1963年生, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为无线通信与通信信号处理。