

OFDM系统中基于时域过采样的频率同步算法

海 玲

(新疆工程学院控制工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830023)

摘 要: 针对正交频分复用OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)系统对频率偏移极其敏感的问题,研究了基于训练序列的Schmidl频偏估计算法,提出了一种基于时域过采样的频率同步算法。通过软件仿真,得出结论,提出的算法在信噪比高的情况下能基本不失真的复原发端数据,在信噪比低的情况下优势非常明显,发送端发送的原始数据能够被很好地复原出来,同时该算法在频率资源利用率方面,在信号传输速率方面,都比原有算法有所提高,在现实中实现方便。

关键词: 正交频分复用(OFDM);同步;频率偏移;频偏估计

中图分类号: TP301 **文献标识码:** A

The Frequency Synchronization Algorithm Based on the Time Domain Oversampling in OFDM System

HAI Ling

(Department of Electrical and Information, Xinjiang Institute of Engineering, Urumqi 830023, China)

Abstract: In order to solve the problem that Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) is sensitive to frequency offset, after studying the Schmidl frequency offset estimation algorithm based on training sequence, the frequency synchronization algorithm based on time-domain oversampling is proposed in this paper. The simulation results show that the proposed algorithm can recover the original data of the sender in the case of low SNR. And the algorithm not only can improve the utilization rate of the frequency resource and signal transmission rate, but also it is easy to implement.

Keywords: Orthogonal Frequency Division Multiplexing(OFDM); synchronization; frequency offset; frequency offset estimation

1 引言(Introduction)

正交频分复用(OFDM)技术的提出可以追溯到20世纪50年代,经过十余年的发展,在60年代被首先应用在军工方面的无线信号高频通信链路中。OFDM属于多载波调制技术的一种,他不仅是正交频分复用技术又是载波调制技术。OFDM技术具有频谱利用率高,能方便地采用FFT技术进行调制解调,有很强的抗多径衰落和窄带噪声的能力,易与其他技术结合等诸多优点,在当前移动通信领域中被广泛应用。对OFDM系统来说,对频率偏移的研究至关重要。为了解决以上问题,国内外的众多专家、学者发表了很多的文献对OFDM技术中的频率同步问题进行研究分析^[1-3]文献[3]研究了基于PN序列的时频同步算法,该算法能估计小时倍和整数倍频偏,但是需要在发送端前加训练序列,传输效率一般。文献[4]中,提出构造完全相同的两个训练块置于分组或帧的头部,利用相同的结构之间的时域相关性来进行频偏估计,这

种算法有其优势,但存在问题,当重复数递增时精度会逐渐降低,这种算法的精度会随着重复数的增加而降低,导致后续接下来的信道估计准确度随之下降,当信道衰落时,系统性能变差。文献[5]通过构造具有对称结构的训练序列使得定时度量变得尖锐,有效提升了定时估计性能,但该算法无法估计频偏。

2 载波频偏的产生(Generation of carrier frequency offset)

频率偏差的存在主要由于发射端和接收端有振荡器存在且接收信号的载波频率会受到多普勒效应的影响产生偏差,振荡器的存在和多普勒效应的影响结果是使频率偏差在接收到的数据流中出现,为了方便表达,假设接收信号的实际残留频率偏差与OFDM子载波的间隔用 Δf 表示,则解调以后的信号表达式为:

$$r(t) = a(t) \exp(j2\pi ft) \exp(-j2\pi \hat{f} t) = b(t) \exp(j2\pi \Delta f t) \quad (1)$$

式中, $\Delta f = f - \hat{f}$, 表示调制载波与解调制载波二者存在的频率偏差, 为了估算出该偏差并且将这一偏差减小引入了频率同步。

载波频率偏差之所以会出现是因为发射端和接收端存在不一样的频率。载波频率偏差有两种不同的情况, 其中当频率偏差是子载波整数倍的时候, 不会对OFDM的正交性能产生破坏性的影响, 但是会产生很大的误码率, 对系统传输带来一定的影响, 导致其不可靠。另一种情况则是频率偏差是子载波间隔的小数倍, 这个时候对系统的正交性能的破坏性是比较明显的, 也会对子载波产生一些干扰, 影响系统性能的稳定。载波频率偏移对于单载波系统和多载波系统的影响是不一样的, 从其对单载波系统的影响来看, 它会对接收端的信号产生影响, 导致其相位发生旋转, 但是可以将均衡器引入其中, 以此来弥补载波频率偏移的影响。但是对多载波系统产生的影响是比较大的, 不仅具有对单载波系统影响的缺点, 而且会对多载波系统带来很大干扰, 导致信号的相位发生很大的变化, 影响整个系统的性能, 因此需要引起重视, 采取科学的估算方法。

3 Schmidl频偏估计算法(Schmidl frequency offset estimation algorithm)

偏频会对子载波的正交性造成一定的破坏, 影响传输信息数据的不精确性, 还会造成信号失真, 对于整个OFDM系统的性能带来很大影响, 不能充分发挥正交频分复用(OFDM)技术的优势。偏频估计算法是数字通信中一个比较重要的问题, Schmidl频偏估计算法是比较常用的方法, 被广泛应用到OFDM系统中。Schmidl算法^[4]的基本原理是: 加入训练序列1和训练序列2被放置在OFDM数据符号的头部, 训练序列1和训练序列2是两个具有特殊结构的训练符号, 当伪随机PN序列被在偶频率上发送, 且零获得被在奇频率上发送时, 这样发送的数据即可形成第一个训练符号; 第2个训练符号是由在奇频率上传输的被测量的子信道和在偶频率上传输一个伪随机PN序列形成的, 利用这些序列进行频偏估计。FFO小数频偏估计以及整数倍频率偏移IFO的表达式为:

$$\hat{\Delta f} = [\hat{\phi} / \pi T] + (2g/T) \quad (2)$$

4 基于时域过采样的频率偏移同步估计算法(Frequency offset synchronization estimation algorithm based on time domain oversampling)

4.1 S&C频偏估计算法优缺点分析

S&C算法基于两段完全相同的时域训练序列, 在设计频率估计时, 子载波间隔分辨率大小的频偏可以用训练序列的前两段进行估计, 估计模糊问题可以用后段训练序列进行解决, 后段训练序列因为包含伪随机序列可以很好地解决估计模糊问题。虽然S&C频偏估计算法能进行整数倍和小数倍频偏的估计, 但是该算法需要在发送数据前构造复杂的两个训练序列1和2, 同时在频谱利用率、传输速率方面效果一般。基于此, 本文提出了一种基于时域过采样的频率偏移同步估计算法。

4.2 改进的频偏估计算法

发送信号自身具有特殊结构, 利用这一特点估计频率

偏移, 是改进的频偏估计算法的特点, 与基于训练型序列Schmidl算法相比, 改进算法的估计精度会更高。

假设发送端连续复基带OFDM信号表示如下:

$$s(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} d_k e^{j\frac{2\pi k}{T}(t-t_s)}, t_s \leq t \leq t_s + T \quad (3)$$

载波上的星座映射, t_s 用来表示OFDM符号的开始时间, τ 用来表示OFDM符号的持续时间, $T_s = T/N$ 表示符号间隔, 若 $s(t)$ 在 $t = t_s + nT_s + \tau$ 的点进行抽样, 初始时刻偏移点被用 τ 表示, 其中 $n=0, \dots, N-1$, 当 τ 的取值改变时, OFDM符号模型的离散形式可以用下面两个式子表示:

$\tau = 0$ 时, 有:

$$s_1(n) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} d_k e^{j\frac{2\pi nk}{N}} \quad (4)$$

$\tau = \frac{T_s}{2} = \frac{T}{2}$ 时, 有:

$$s_2(n) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} d_k e^{j\frac{2\pi k(n+\frac{1}{2})}{N}} \quad (5)$$

把式(4)和式(5)两种离散形式的信号写成矩阵形式为:

$$S_1 = WE d \quad (6)$$

$$S_2 = WE d \quad (7)$$

其中, d 是符号矢量 $[d_0, d_1, \dots, d_{N-1}]^T$, 和 $E = \text{diag}\left(1, e^{j\frac{\pi}{N}}, e^{j\frac{2\pi}{N}}, \dots, e^{j\frac{(N-1)\pi}{N}}\right)$,

W 是IDFT变换矩阵:

$$W = \begin{bmatrix} W_N^{0-0} & W_N^{0-1} & W_N^{0-2} & \dots & W_N^{0-(N-1)} \\ W_N^{1-0} & W_N^{1-1} & W_N^{1-2} & \dots & W_N^{1-(N-1)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ W_N^{(N-1)-0} & W_N^{(N-1)-1} & W_N^{(N-1)-2} & \dots & W_N^{(N-1)-(N-1)} \end{bmatrix}_{N \times N} \quad (8)$$

其中, $W_N^{kn} = \frac{1}{\sqrt{N}} e^{-j\frac{2\pi nk}{N}}$, 而 $k=0, 1, 2, \dots, N-1$ 。

当信号通过, 收发两端存在频偏时, 下式的基带信号是用来表示在具有AWGN的衰落信道中信号被传输时, 发送端和接收端有频率偏移 $\Delta\omega$ 时的情况:

$$x(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} H(k) d_k e^{j\left(\frac{2\pi k}{T} + \Delta\omega\right)(t-t_s)} + z(t) \quad (9)$$

式(9)在 τ 发生变化时, 可以被表示为两种离散形式的OFDM符号模型, 如 τ 取零值时:

$$x_1(n) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} H(k) d_k e^{j\left(\frac{2\pi k}{N} + \Delta\omega T_s\right)n} + z_1(n) \quad (10)$$

当 $\tau = T_s/2 = T/2N$ 时, 有:

$$x_2(n) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} H(k) d_k e^{j\left(\frac{2\pi k}{N} + \Delta\omega T_s\right)\left(n+\frac{1}{2}\right)} + z_2(n) \quad (11)$$

其中, $z_1(n)$ 和 $z_2(n)$ 是AWGN信号, $S_1 = WE d \phi \triangleq \Delta\omega \cdot T_s$ 。

式(10)和式(11)两种离散形式的信号写成矩阵形式为:

$$X_1 = P W \tilde{d} + z_1 \quad (12)$$

$$X_2 = e^{j\phi/2} P W E \tilde{d} + z_2 \quad (13)$$

式中的 $\tilde{d} = H d$, 其中具有对角元素 $H(k)$ 的对角矩阵用 H 表示, $P = \text{diag}\left(1, e^{j\phi}, \dots, e^{j(N-1)\phi}\right)$, 通过分析上两式, 信道脉冲响应 H 是需要求解的, 而 $\tilde{d} = H d$, 因此 \tilde{d} 也是需要求解的, 借助式(12)、式(13)能够进行盲估计从而求解频率偏移 ϕ , 在这里需要做如下构造:

$$y_1 = W^H P^H X_1 \quad (14)$$

$$y_2 = e^{-j\phi} E^H W^H P^H X_2 \quad (15)$$

把式(12)、式(13)带入式(14)、式(15)可以推导出以下关系:

$$y_1 = y_2 = \bar{d} \quad (16)$$

结合式(16),整理可知:

$$\phi = -2 * \text{angle} \left(\frac{W^H P^H x_1}{E^H W^H P^H x_2} \right) \quad (17)$$

从此式可以得知 $\Delta\omega = \phi / T_s$ 为整数倍频偏。

5 性能仿真及分析(Performance simulation and analysis)

OFDM是多载波调制技术的一种,系统容量大、频谱效率高是其显著的优点,各个子载波之间是呈正相交的关系^[6]。但是在调制过程中,会出现一些频偏的现象,而OFDM系统对频率误差十分敏感,这种频偏不注意的话,会对系统性能造成一定程度的破坏,影响系统的稳定性^[7]。为了验证改进的时域过采样的盲频率偏移同步估计算法的性能,采用了仿真的方式,把Schmidl^[4]算法和时域过采样的盲频率偏移同步估计算法做了比较图以清晰的显示改进前和改进后性能的改善,其中表示循环前缀,在这里取值为512, N取值为2048,采用QAM调制系统,频率偏移 $\Delta\omega$ 采用随机发生器提供,然后输入到接收信号中。从仿真分析中可以看出,使用时域过采样的盲频率偏移同步估计算法从整体性能上优于Schmidl算法,当SNR值较小时,发送端发送的原始数据能被很好地复原,同时改进的算法在频率资源利用率方面也有所提高,信号在信道中的传输速率也会更快,现实中实现方便。综合以上优点,当出现训练序列不适合在发送端添加时,同时系统对传输效率要求较高时可以采用时域过采样的盲频率偏移同步估计算法。

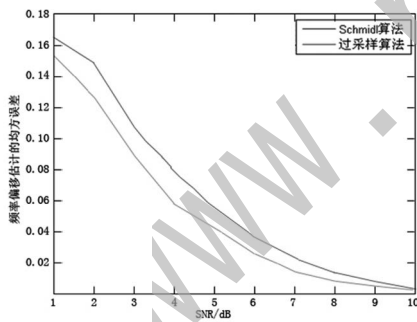


图1 在不同信噪比时, S&C算法和时域过采样的频率偏移同步估计算法的频率偏移估计的均方误差

Fig.1 Mean square error of frequency offset estimation of S&C and time-domain oversampling frequency offset synchronization estimation algorithms at different SNRs

图2用来分析在载波偏差发生变化时,与SNR与估计性能之间存在的关系,在仿真分析中载波间隔取0、±3.5,在这种情况下进行仿真,图形如下,从图中得出结论,当载波间隔为0、±3.5时,仿真图形几乎是重合的,由此可以获得当算法的估计精度发生改变时,残留的载波偏差不会随着算法的估计精度的改变而改变。

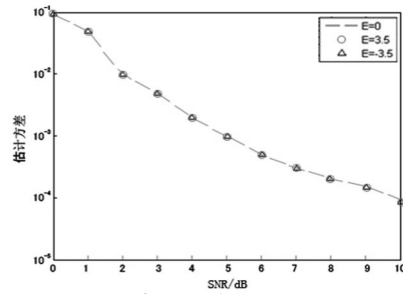


图2 子载波偏差下的估计性能

Fig.2 Estimation performance under subcarrier bias

6 结论(Conclusion)

频偏估计算法在正交频分复用(OFDM)技术中至关重要,直接影响数据的信号接收情况和数据传输的准确性^[8,9]。本文针对频偏对OFDM系统的影响,在充分研究分析S&C频偏估计算法基础上,概括出该算法存在的问题,由此,提出了基于时域过采样的频偏估计算法,原有算法需要在发送信号前构造复杂的两个训练序列,利用训练序列的结构特点进行频偏估计,改进算法是以发送信号作为对象,在已获取多个不同采样点的情况下,把这些采样点插于信号序列当中,即使其成为发送信号的一个组成部分,同时前提条件是作为对象的发送信号自身结构是特殊的,满足以上条件后进行频率偏移的估计,通过仿真可以得出结论,当SNR值较小时,发送端发送的原始数据能被很好地复原,同时改进的算法在频率资源利用率方面也有所提高,信号在信道中的传输速率也会更快,现实中实现方便。综合以上优点,当出现训练序列不适合在发送端添加时,同时系统对传输效率要求较高时可以采用时域过采样的盲频率偏移同步估计算法。

参考文献(References)

- [1] 唐宏,方文平,孙伟.一种LTE系统中基于循环前缀的载波频偏估计方法[J].电子测试,2010,1(04):4-6.
- [2] 俞永祥,李立华.一种联合整数倍频偏和定时偏差估计的OFDM同步算法[J].新型工业化,2011,1(09):1-8.
- [3] Schmidl T M,Cox D C.Robust Frequency and Timing Synchronization for OFDM[J].IEEE Transactions on Communications,1997,45(07):1800-1805.
- [4] Park B,Cheon H,Kang C,et al.A Novel Timing Estimation Method for OFDM Systems[J].IEEE Communications Letters,2003,7(05):239-241.
- [5] 张子文.基于最大似然算法的OFDM同步技术研究[J].通信技术,2010,43(05):16-18.
- [6] 赵江锋,张会生,李立欣.一种改进的OFDM定时同步算法[J].现代电子技术,2011(03):10-13.
- [7] 朱秋萍,朱亮,戴加良.一种基于PN训练序列的OFDM时频同步算法[J].武汉大学学报(理学版),2008(01):4-5.
- [8] 王思拔,马社祥,孟鑫,等.基于训练序列的OFDM频率同步改进算法[J].电子技术应用,2017(03):22-24.
- [9] 李颖.基于循环前缀的OFDM同步算法仿真分析[J].信息化研究,2017(01):20-23.

作者简介:

海玲(1982-),女,硕士,讲师.研究领域:信号处理与检测,计算机网络.