

一种低信噪比 TDMA 信号的载波同步算法

王军杰 彭华 曹鹏

(解放军信息工程大学, 河南 郑州 450002)

摘要: 本文深入研究了基于 FFT 运算进行相位扩展的宽范围自相关函数法和宽范围 L&R 算法, 分析了这两种载波频偏估计算法的性能。在此基础上, 本文结合 TDMA 信号的前导字和 CZT (chirp z-transform) 算法的高频率分辨率特性, 设计了适于低信噪比信号的宽范围载波同步改进算法。该算法利用 TDMA 信号的前导字进行数据辅助 (DA) 型载波同步, 有效地缩小了低信噪比信号的频偏范围; 再利用 CZT 算法进一步缩小频偏范围, 最后利用非数据辅助型 (NDA) 自相关函数法得到精确的载波频偏。改进算法的计算复杂度略高于宽范围自相关函数法, 而远低于宽范围 L&R 算法。通过仿真比较, 改进算法对低信噪比 (SNR) 环境 (3-6dB) 中的信号具有良好且稳定的估计性能。

关键词: 载波同步; 低信噪比; TDMA; CZT 算法

中图分类号: TN911.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0530(2010)09-1329-05

An improved algorithm of carrier synchronization for TDMA signal under low SNR

WANG Jun-jie PENG Hua CAO Peng

(Information Engineering University, Zhengzhou Henan 450002, China)

Abstract: To analyze the carrier estimation performance, wide-spectrum auto-relation algorithm and wide-spectrum L&R algorithm, which can realize wide frequency offset range estimation based FFT algorithm, are discussed in this paper. Based on the discussion, combining the pilot of TDMA signal with vivid frequency distinguishability of CZT (chirp z-transform) algorithm, an improved algorithm which fits for carrier synchronization of low signal-to-noise ratio (SNR) signal with large carrier offset range is designed. The data-aided (DA) carrier synchronization using the pilot of TDMA signal can efficiently shorten the carrier offset range of low SNR signal, then using the CZT algorithm to reduce the frequency offset range further, the accurate carrier frequency offset will be gotten by non-data-aided (NDA) auto-relation algorithm finally. The complexity of the improved algorithm is a little higher than wide-spectrum auto-relation algorithm, but much lower than wide-spectrum L&R algorithm. Comparing with other algorithms, simulation results show that the improved algorithm has a good and steady performance under low SNR (3-6dB).

Key words: carrier synchronization; low SNR; TDMA; CZT algorithm

1 引言

载波同步是实际通信中必须解决的问题。随着卫星接收设备的小型化, 接收信号呈现信噪比越来越低的趋势。当移动用户终端处于卫星信号的旁瓣区域时, 接收信号的质量变差将影响用户的正常通信。因此, 如何在低信噪比下实现信号的快速同步成为亟需解决的问题。

卫星 TDMA 信号属于一类特殊的突发信号, 其信号持续时间短、各帧中的符号数量少, 且不同数据帧的频偏差异大。本文将研究前向型同步算法。经典的前

向载频估计算法, 如: L&R 型算法^[1]、Fitz 型算法^[2]等, 计算复杂度高、存在相位混叠现象^[3]。为了消除相位混叠现象, 文献[4]给出了利用自相关函数(delay-multiplication-addition, DMA)迭代实现相位扩展、提高估计性能的方法。文献[5][6]利用 FFT 运算进行载频估计, 但估计精度受限于 FFT 运算点数。文献[3]在 FFT 粗估计的基础上结合自相关函数提出了宽范围自相关函数法; 文献[7]对 FFT 粗频偏校正后的信号利用 L&R 算法进行精估计而得到宽范围 L&R 算法。在用于参数估计的信号长度较短时, 宽范围 L&R 算法的估计性能优于宽范围自相关函数法, 而计算复杂度略高;

在信号长度较长时,宽范围自相关函数法的估计性能接近宽范围 L&R 算法,但计算复杂度明显降低。上述算法对整帧 TDMA 信号进行盲处理,在低信噪比(3-6dB)环境下,同步效果不尽理想。

TDMA 信号帧包含前导字和数据两部分,通常前导字是已知的。利用前导字可进行数据辅助(DA)载频同步,有利于提高同步算法的抗噪能力。众所周知,同步算法的性能与用于参数估计的信号长度有关,长度越长,估计性能越好。仅利用长度较短的前导字进行 DA 型同步,算法估计误差造成的剩余载频仍很大。为了提高估计性能,需对经 DA 载频估计并频偏校正后的信号进行整帧非数据辅助(NDA)型载频估计。受剩余频偏的影响,在整帧信号的 NDA 型估计时需进行相位扩展。因为前导字的长度固定,所以经 DA 载频估计并频偏校正后剩余频偏范围已知。在有限的频偏范围内,适当地提高频率分辨率有助于提高估计性能。因此,本文在 NDA 估计时,用可以设置起始频率和频率分辨率的 CZT 运算^[8] 替换了 FFT 运算。仿真结果显示,改进算法对低信噪比信号有良好且稳定的同步性能。

2 信号模型描述

通常 TDMA 信号采用 MPSK 调制,其接收信号表达式为:

$$r_k = a_k \exp[j(2\pi f_e kT + \theta_0)] + n_k \quad (1)$$

其中, a_k 为 k 时刻发送符号, n_k 为复高斯白噪声, θ_0 表示未知的初始相位, f_e 为信号的载波频率偏差。

对接收信号进行去调制处理而得到^[3]

$$z_k = \begin{cases} r_k \cdot a_k^* & DA \\ F(|r_k|) \exp(jM \cdot \arg(r_k)) & NDA \end{cases} \quad (2)$$

文献[9]指出在低信噪比时,取 $F(|r_k|) = |r_k|^2$ 可以得到最佳的同步性能。但为了降低实现复杂度,本文取 $F(|r_k|) = |r_k|^M$ 进行去调制处理。

设 MPSK 信号 Z_k 的观测长度为 N ,自相关函数 $R(m)$ 定义如下:

$$R(m) = \frac{1}{N-m} \sum_{i=m}^{N-1} z_i z_{i-m}^*, 1 \leq m \leq N-1 \quad (3)$$

此时 $R(m)$ 等效为一个含噪声的复单频信号。

3 载波同步算法

对去调制后的 Z_k 进行 K 点 FFT 运算,则这 K 个值

中的最大值应为距 Δf 最近的频率,记为 \hat{f}_{FFT} , 即

$$\hat{f}_{FFT} = \underset{f \in \left\{ \frac{2k-K}{2TK}, (k=0, \dots, K-1) \right\}}{\arg \max} \left[\left| \sum_{i=1}^K z_i \exp(-j2\pi f iT) \right|^2 \right] \quad (4)$$

文献[7]利用 L&R 算法的良好估计性能,与 FFT 运算结合而得到宽范围 L&R 算法:

$$\hat{f} = \begin{cases} \hat{f}_{FFT} + \frac{1}{\pi T(N/2 + 1)} \arg \left\{ \sum_{m=1}^{N/2} R(m) \right\} & DA \\ \hat{f}_{FFT} / M + \frac{1}{\pi T M(N/2 + 1)} \arg \left\{ \sum_{m=1}^{N/2} R(m) \right\} & NDA \end{cases} \quad (5)$$

文献[3]指出,时延越大,自相关函数中携带频差信息的信噪比越高。与 L&R 算法不同,Fitz 算法对大时延自相关函数估计的频偏赋予大权重^[3]。为简化算法,可采用一项或几项高时延自相关函数来估计频偏。当观测数据长度一定时,随着 m 值的增加用以计算 $R(m)$ 的时间平均次数减少,从而降低 $R(m)$ 的估计精度,因此 m 值的增加应有一定的限度。文献[3]利用贡献最大的 $R(N/2)$ 结合 FFT 运算而得到宽范围自相关函数法:

$$\hat{f} = \begin{cases} \hat{f}_{FFT} + \frac{\arg \{R(N/2)\}}{\pi N T} & DA \\ \hat{f}_{FFT} / M + \frac{\arg \{R(N/2)\}}{\pi N M T} & NDA \end{cases} \quad (6)$$

文献[10]根据对数似然函数得到了衡量载频估计性能的 MCRB 形式如下:

$$MCRB_f = \frac{1}{E_s/N_0} \frac{3}{2\pi^2 N(N^2 - 1)} \frac{1}{T^2} \quad (7)$$

上述的同步算法具有普适性,可用于 TDMA 信号的同步中。但仅进行盲估计不能充分利用 TDMA 信号的信息,因此本文在 TDMA 信号同步时利用前导字进行 DA 同步。

3.1 利用前导字的 DA 估计

假设一个 TDMA 信号帧包含 1024 个符号,其中前 64 个符号为前导字,调制方式采用 QPSK,信道为加型白高斯噪声信道。利用长度较短的前导字进行 DA 同步时,采用宽范围 L&R 算法估计性能优于宽范围自相关函数法,而计算复杂度略高。

图 1 给出了基于前导字的 DA 型宽范围 L&R 算法的估计性能。

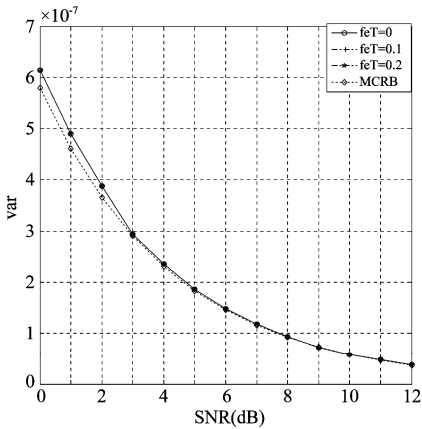


图1 前导字的DA估计性能

从图1可以看出,利用前导字的DA同步性能接近MCRB。但由于前导字的长度短,同步误差较大,如:当符号SNR为5dB时,MCRB为 1.834×10^{-7} 。要得到实用的同步算法,仅利用前导字还远远不够,因此须增加估计长度以减小方差。

3.2 NDA 载频精估计

用于频率估计的数据长度越长,估计性能越好,因此,本文对整帧数据进行估计。由于数据部分的调制信息未知,所以对整帧数据采用NDA型估计来实现载频的精估计。

对于QPSK信号,在进行1024点NDA型频率估计时,若不进行相位扩展,则要求信号的频偏范围 $f_e T \leq 1/4096$ 。在进行64点DA估计后,剩余频偏超过了该1024点NDA型载波估计的范围,需要设计一种合理的相位扩展算法。

3.2.1 DMA 算法

由文献[4]可知,(3)式可表示为

$$R(m) = |A_m| e^{j2\pi \Delta f m T} + \gamma(m), 1 \leq m \leq N-1 \quad (8)$$

要避免相位混叠,则要求 $|2\pi \Delta f m T| \leq \pi$,故 $R(m)$ 估计范围为:

$$|\Delta f| \leq \frac{1}{2MmT} \quad (9)$$

时延越大的自相关函数估计范围越小,而对抗噪声的能力越强。因此,文献[4]提出通过依次增大时延长度而实现相位扩展。但时延长度小时,这种DMA算法受噪声影响较大,不能满足低信噪比信号的同步要求。

3.2.2 宽范围自相关函数法

基于FFT运算的宽范围自相关函数法^[3]可以有效地扩大信号的同步范围,因此可以在前导字DA估计的基础上,利用宽范围自相关函数法对粗频偏校正后的信号进行精估计,则估计结果为

$$\hat{f} = \hat{f}_{DA} + \frac{\hat{f}_{FFT}}{M} + \frac{\arg\{R(N/2)\}}{\pi NMT} \quad (10)$$

利用宽范围自相关函数法进行精估计时,需要在FFT频谱的全频段内搜索谱峰位置。经DA估计后,剩余频偏的范围有限,在进行NDA估计时可认为载波频偏范围已知,因此,实际操作中可以在一定频带内进行搜索。本文在 $f_e T \in [-1/128, 1/128]$ 内进行搜索。

3.2.3 本文改进算法

利用TDMA信号的前导字进行DA同步后,剩余载波频偏的范围有限且已知,本文在NDA型估计中采用CZT运算替代FFT运算进行相位扩展。

CZT算法^[8]定义为:

$$X(z_k) = W^{\frac{k^2}{2}} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} x(n) A^{-n} W^{\frac{n^2}{2}} W^{-\frac{(k-n)^2}{2}}, 0 \leq k \leq K-1 \quad (11)$$

其中 $A = A_0 e^{j\theta_0}$, $W = W_0 e^{-j\varphi_0}$ 。

CZT算法可以根据参数设置起始频率和频率分辨率。在本文中, $\theta_0 = -2\pi/128$, $\varphi_0 = 2\pi/(64M(K-1))$ 。

在完成相位扩展的基础上,通过计算自相关函数 $R(N/2)$ 而得到精确的频偏估计值,实现过程如图2所示:

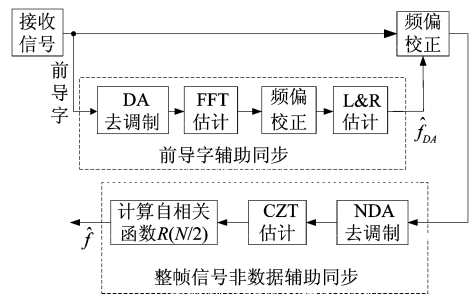


图2 改进算法实现框图

由图2可得,改进算法的频率估计值为:

$$\hat{f} = \hat{f}_{DA} + \frac{\hat{f}_{CZT}}{M} + \frac{\arg\{R(N/2)\}}{\pi NMT} \quad (12)$$

CZT运算的输出长度越长,频率分辨率越高,但计算复杂度越大。因此需要综合考虑估计性能和计算复杂度来确定CZT运算的输出长度K。

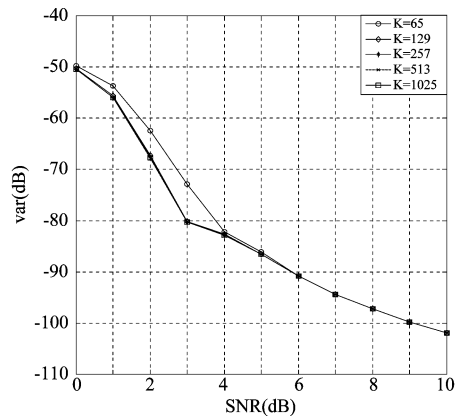


图3 不同输出长度下性能比较

由图3中可以看出,改进算法的估计性能随着 CZT 输出长度的增大而提高,但当 CZT 输出长度长于 129 时,改进算法的估计性能差别不大,因此本文取 CZT 的输出长度 $K = 129$.

4 算法分析

本文算法在宽范围自相关函数法和宽范围 L&R 算法的基础上,结合 TDMA 信号的前导字和 CZT 运算而得到的。因此,本文算法继承了这两种算法的宽估计范围的特点,能实现大频偏信号的载波同步问题。

宽范围 L&R 算法的计算复杂度随着观测信号长度地增加而呈指数型增长,若将它用于针对整帧数据进行 NDA 型载波频差估计,运算量过大,因此本文不再对宽范围 L&R 算法进行仿真。设 A 算法表示前导字 DA 宽范围 L&R 算法和整帧 NDA 宽范围自相关函数法的联合估计,B 算法表示前导字 DA 宽范围 L&R 算法和整帧 NDA-DMA 算法联合估计,C 算法表示本文改进算法,D 算法表示整帧 NDA 宽范围自相关函数法。仿真使用 AWGN 下的 QPSK 信号,即 $M = 4$,TDMA 信号帧长为 1024,其中前导字部分含 64 个符号。

4.1 估计范围

本文在 SNR 为 4dB 时进行了仿真,结果如下图:

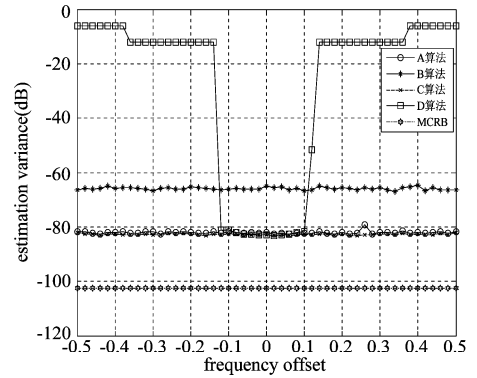


图4 不同频偏下的性能比较

A、B、C 算法中 FFT 运算的处理对象为基于前导字 DA 去调制的信号,故理论估计范围为 $\hat{f}_{FFT}T \in [-1/2, 1/2]$; 而 D 算法对整帧信号进行 NDA 去调制,故理论估计范围为 $\hat{f}_{FFT}T \in [-1/8, 1/8]$ 。由图4可知,实际估计范围与理论估计范围一致。

4.2 计算复杂度

在进行载波同步过程中,主要运算包括去调制信息、FFT 运算、频偏校正和频偏参数估计等部分。

表1 计算复杂度分析

	复数乘法次数	复数加法次数
A 算法	$L+3L^2/4+L/2\log_2L+9N/2+ N/2\log_2N$	$3L^2/4-L+L\log_2L+N/2+ N\log_2N$
B 算法	$L+3L^2/4+L/2\log_2L+49N/8$	$3L^2/4-L+L\log_2L+49N/16$
C 算法	$L+3L^2/4+L/2\log_2L+9N/2+(N+K-1)[\log_2(N+K-1)+2]$	$3L^2/4-L+L\log_2L+N/2+(N+K-1)\log_2(N+K-1)$
D 算法	$9N/2+ N/2\log_2N$	$N/2+ N\log_2N$
宽范围 L&R 算法	$3N^2/4+3N+ N/2\log_2N$	$3N^2/4-N+ N\log_2N$

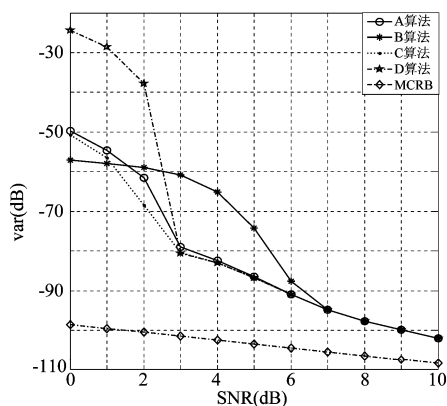
当帧长 $N = 1024$ 、前导字长度 $L = 64$, CZT 算法的输出长度 $K = 129$ 时,五种算法的计算复杂度依次为:复数乘法次数 13056、9600、21956、9728、794624;复数加法次数 14144、6528、15620、10752、795648。由此可知,B 算法的计算复杂度最低,改进算法 C 的计算复杂度较 A、B、D 算法有明显地增加,而宽范围 L&R 算法的计算复杂度远高于其它算法。

4.3 估计性能

算法的同步性能受信噪比和观测信号帧长的影响,由于信号帧长固定,因此本文在不同信噪比下进行仿真。同时为了检验算法的稳健性,本文分别对无频

偏和频偏为 0.1 的信号进行了仿真。

从图5中可以看出在高信噪比时,几种算法的估计性能相近,而在低信噪比时 C 算法的估计性能最好,A 算法次之;D 算法存在明显的信噪比门限,在信噪比高于 4dB 时,估计性能良好,而在信噪比低于 3dB 时估计性能较差;将图(a)与图(b)进行对比,可以看出 A 算法和 D 算法受频偏的影响较大;B 算法在信噪比低于 1dB 时,估计性能优于其它算法,而在信噪比为 2-6dB 时,估计性能较差;C 算法在 3dB 时即可得到良好的估计性能且受频偏影响小。



图(a) 无频偏

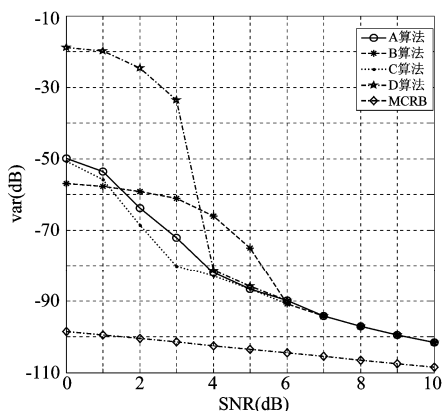
图(b) 频偏 $f_e T = 0.1$

图5 不同信噪比下同步性能比较

5 结论

通过对多种同步算法的研究比较,在宽范围L&R算法和宽范围自相关函数法的基础上,本文结合TDMA信号的前导字和CZT算法的高分辨率特点提出了改进算法。借助已知的前导字,改进算法的估计范围可达 $1/2T$,计算复杂度较宽范围自相关函数法有所增加,但估计性能和稳定性均增强;与宽范围L&R算法相比,改进算法的计算复杂度明显降低。仿真结果显示,在低信噪比时本文改进算法的估计性能和估计范围优于常用的载频同步算法。但由于在NDA型估计过程中,采用非线性变换进行去调制,因此改进算法仍存在一定的信噪比门限现象。

参考文献

- [1] M. Luise, R. Reggiannini. Carrier frequency recovery in all-digital modems for burst-mode transmission[J]. IEEE Transactions on Communications, 1995, 43(2): 1169-1178.
- [2] M. P. Fitz. Further results in the fast estimation of a signal frequency[J]. IEEE Transactions on Communications, 1994, COM-42(2):862-864.
- [3] 彭华. 软件无线电中的盲接收技术研究[D]. 郑州:解放军信息工程大学, 2002.
- [4] S. N. Crozier. Low complexity frequency estimator with close-to-optimum performance[A]. In proceedings of 1993 International Conference on Universal Communications[C], 1993:426-430.
- [5] 黄玉春, 黄载禄, 黄本雄, 徐书华. 基于FFT滑动平均极大似然法的正弦信号频率估计[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(4):831-835.
- [6] 耿志辉, 王玉林. 实正弦信号频率估计的高精度综合算法[J]. 无线电工程, 2008, 38(3):28-30.
- [7] 李静, 彭华, 葛临东. 一种宽范围的最大似然载波频率同步算法[J]. 系统工程与电子技术, 2006, 28(3): 369-371.
- [8] F. X. Ge, D. X. Shen, A. F. Sui et al. Iterative CZT-based frequency offset estimation for frequency-selective channels[J]. ICC 2005:2157-2161.
- [9] A. J. Viterbi, A. M. Viterbi. Nonlinear estimation of PSK-modulated carrier phase with application to burst digital transmission[J]. IEEE transactions on information theory, 1983, IT-29(4):543-551.
- [10] N. Noels, H. Steendam, M. Moeneclaey. The true Cramer-Rao bound for carrier frequency estimation from a PSK signal[J]. IEEE Transactions on Communications, 2004, 52(5):834-844.

作者简介

王军杰(1985-),男,河北元氏,硕士研究生,主要研究方向为通信信号处理。E-mail:andrew2022@163.com

彭华(1973-),男,江西萍乡,博士,硕导,教授,主要研究方向为通信信号处理与软件无线电。

曹鹏(1983-),男,山东新泰,硕士研究生,主要研究方向为通信信号处理。