

卫星移动通信信号处理同步技术研究

陈志星, 杨金孝, 纪鹏

(西北工业大学 电子信息学院, 西安 710129)

摘要: 卫星移动通信信号处理同步技术很大程度上决定了通信的质量; 针对卫星移动通信系统中突发信号符号长度短、独特码少的特点, 对传统的基于最大似然准则线性相位内插相位估计算法和二次插值快速傅立叶变换频偏估计算法进行了研究, 进行了线性相位内插算法和二次插值快速傅立叶变换频偏估计算法机理分析; 根据噪声平均化原则, 提出了一种低导频段数据情况下改进的线性相位内插算法; 利用数据段信息和导频段信息整体做频偏估计的方法, 提高了导频段个数较少情况下的频偏估计精度; 仿真与试验结果表明: 改进的线性相位内插算法比传统算法相位同步性能更高, 利用整帧数据做频偏估计精度更高, 并满足卫星移动通信终端信号处理的要求。

关键词: 卫星移动通信; 突发信号; 相位同步; 频率同步; 导频段; 独特码

Research on Synchronous Technology of Satellite Mobile Communication Signal Processing

Chen Zhixing, Yang Jinxiao, Ji Peng

(School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

Abstract: Satellite mobile communication signal processing synchronization technology largely determines the quality of communication. For the feature of short burst signal and less unique word in the satellite mobile communication system, this paper studies the traditional linear phase interpolation algorithm based on maximum likelihood criterion and quadratic interpolation FFT frequency deviation estimation algorithm. And this paper analyzes the mechanism of linear phase interpolation algorithm and FFT frequency deviation estimation algorithm. According to the principle of noise averaging, this paper presents an improved linear phase interpolation algorithm in low pilot frequency data. Using the data segment information and the channel information to estimate the frequency deviation, this paper improves the accuracy of frequency deviation estimation in less conduction band. Simulation and test results show that: the improved linear phase interpolation algorithm is better than the traditional algorithm, the accuracy of frequency deviation estimation is higher and meet the signal processing requirements of satellite mobile communication terminals.

Keywords: satellite mobile communication; burst signal; phase synchronization; frequency synchronization; conduction band; unique word

0 引言

随着近年来自然灾害的频发, 地面蜂窝移动通信网对边远区域以及应急、灾害情况下的用户覆盖范围存在不足, 而卫星移动通信具有通信距离远、覆盖区域广、抗毁性强、传输容量大以及组网方式灵活等优势; 卫星移动通信能弥补地面移动通信的不足, 我国现阶段正在进行拥有自主知识产权的天通一号卫星移动通信系统建设, 研究卫星移动通信信号处理关键技术对促进我国卫星移动通信系统建设有着积极作用。

卫星移动通信终端发起和接收呼叫, 发送并接收业务数据, 是通信的信源和信宿, 其对数据的信号处理能力是影响终端性能的关键之一。卫星通信终端侧的信号处理技术, 主要解决卫星弱信号检测、同步、跟踪、调制解调、信道编解码以及交织和去交织等问题, 其突发信号解调正确的关键技术主要集中在突发信号同步技术上^[1]。

基带信号的同步过程通常分成三部分: 接收设备最初处于信号检测状态, 通过合适检测算法, 检测是否有信号到达; 当检测到信号后立即启动参数估计程序进行频偏、相位、时钟误差等参数的估计; 最后根据得到的参数后进行同步校正, 并对相应的参数继续跟踪处理以提高性能。本文针对卫星移动通信系统中突发信号符号长度短、独特码少的特点, 提出一种改进的相位同步算法及一种频偏估计方法。

1 信号处理同步技术

1.1 相位同步关键技术

虽然卫星移动通信接收终端会对接收信号做频偏估计及补偿, 但终究频偏估计的精度是有限的, 补偿后的信号或多或少还是存在着残留频偏, 这时就需要使用相位估计与补偿来最大程度的减少残留频偏的影响。

现阶段, 常用的相位估计算法是线性相位内插算法, 也即 FFML 方法^[2]。此方法利用帧结构中已知的导频信息进行去调制处理, 而后估计出各段导频的相位, 利用各段导频相位之间的线性关系对导频段之间的数据进行线性插值补偿处理, 因而, 此方法对导频段相位估计的精度要求比较高。

经过大量仿真可知, 一般导频段的数据个数要求在 8 个符号以上, 这段导频的相位估计精度才可以达到 FFML 算法

收稿日期: 2017-10-17; 修回日期: 2017-11-01。

作者简介: 陈志星(1991-), 男, 山东聊城人, 硕士研究生, 主要从事嵌入式系统与卫星通信方向的研究。

杨金孝(1964-), 男, 陕西宝鸡人, 副教授, 硕士研究生导师, 主要从事数据采集与信息处理方向。

的性能要求。但是在卫星移动通信部分物理信道帧结构中导频段符号个数均小于 8 个符号时, 导频段的估计精度难以达到 FFML 算法要求。例如物理信道 DC10, 其突发帧结构见表 1。

表 1 DC10 信道突发定义

半符号周期(HSN)	域长度(HSN)	域内容
0~4	5	保护周期
5~56	52	编码数据
57~70	14	扩展独特码
71~238	168	编码数据
239~252	14	扩展独特码
253~402	150	编码数据
403~416	14	扩展独特码
417~474	58	编码数据
475~479	5	保护周期

从表 1 可以看出, 导频段的数据个数均为 7 个符号, 这时, 帧结构就对相位估计 FFML 算法造成了一定的性能影响。

1.2 频率同步关键技术

由于卫星移动通信中部分突发结构中多个导频段的导频符号个数总和不是很多, 因而使用导频段数据做有数据辅助的频偏估计, 性能会大大折扣, 估计精度不满足系统要求。例如 DC10 信道, 其所有导频段符号的个数总和为 21 个符号, 而导频段符号个数在 96 个以上, 使用二次插值的 FFT 频域频偏估计算法才能达到频偏估计精度要求^[3], 因而利用突发帧结构中的已知导频段进行频偏估计, 会使估计性能急剧恶化, 以至于频偏估计的精度很难达到后续处理的要求精度, 因而需要更多的已知数据去做频偏估计。由于帧结构中已知的各段导频个数以及所有导频个数总和偏少, 导致频率估计性能受到影响, 所以需要找到一种在较少的导频段数据情况下频偏估计精度达到系统要求的方法。

2 同步算法

2.1 相位同步算法

2.1.1 线性相位内插算法

线性相位内插 (FFML) 算法的实现如图 1 所示。

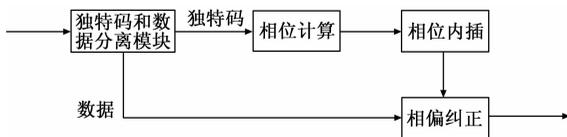


图 1 相位恢复模块实现框图

算法具体内容如下:

1) 对帧结构中内插的各段独特码字进行最大似然相位估计, 估计结果为 $\theta(i), i = 1, 2, \dots, P$, 其中 P 是独特码字段的个数。

2) 计算各个码字段相位估计值 $\theta(i)$ 的之间的相位差 $\Delta\theta(i) = \theta(i) - \theta(i-1), i = 2, 3, \dots, P$, 对 $\Delta\theta(i)$ 做 SAW 函数处理, SAW 函数的表达式为:

$$\text{SAW}(\theta) = \begin{cases} \theta & (\theta \in [-\pi, \pi)) \\ \theta - 2\pi & (\theta \in [\pi, 3\pi)) \\ \theta + 2\pi & (\theta \in (-3\pi, -\pi)) \end{cases} \quad (1)$$

SAW 函数的函数图形如图 2 所示。

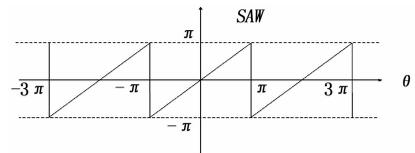


图 2 SAW 函数图

3) 根据 $\theta(i)$ 及经过 SAW 函数的 $\Delta\theta(i)$ 值, 对数据段内的数据相位进行线性均匀内插处理以弥补残留频偏带来的相位误差, 相对应的线性内插公式为:

$$\theta(k) = \theta(i) + \Delta\theta(i) \frac{k}{L} \quad (2)$$

其中: L 表示两导频之间的间隔 (导频+数据段), $\theta(i)$ 为第 i 个导频的频偏估计, $\theta(k)$ 为两导频间第 k 个符号的相位补偿^[4]。

以上就是传统的基于最大似然准则的线性内插算法, 但是这个算法对每段独特码字的个数有最低要求。根据仿真测试, 在每段独特码字符号个数不小于 8 个符号的情况下, 传统算法可以保持很好的相位同步性能, 但是在每段码字符号个数小于 8 个符号的情况下, 算法性能会急剧恶化。对于卫星移动通信系统中, 有很多信道的独特码字段符号个数都小于 8, 因此为了使卫星移动通信系统正常工作, 必须对传统算法做改进。

2.2 频率同步算法

在突发通信中, 频率同步算法根据参数修正方式, 主要分为开环前馈法和闭环反馈法; 按照辅助手段分为数据辅助、非数据辅助和编码辅助 3 种方式^[5]; 针对不同的调制方式, 常采用不同的频率同步方法。QAM 调制常采用非数据辅助方式下的闭环算法, MSK 调制常采用非数据辅助方式下的开环算法, 而 QPSK 调制多采用数据辅助方式下的开环算法。常用的有数据辅助的频偏估计算法有 Kay 算法、Fitz 算法、L&R 算法、M&M 算法及二次插值 FFT 频域频偏估计算法等^[5]; 其中 Kay 算法估计范围与导频符号数无关, 估计精度随导频符号数增大而增大, 但对信噪比要求很高; Fitz 算法和 L&R 算法估计范围较小, 且估计范围与估计精度互相制约; M&M 算法估计范围与导频符号数无关, 估计精度随导频符号数增大而增大, 但估计范围有限; FFT 算法估计范围很大, 结构简单易于实现, 估计精度受导频符号数限制;

以上所有的算法估计精度都受到导频符号数的影响, 针对卫星移动通信中的部分突发结构, 已知的导频段个数总和太少, 以至于频偏估计的精度很难达到后续处理的要求精度, 因而我们需要更多的已知数据去做频偏估计。

2.2.1 二次插值 FFT 频偏估计算法

FFT 即快速傅立叶变换, 实质是 DFT (Discrete Fourier Transform) 的一种快速算法。原始的 FFT 估计算法是频域中的一种估计算法, 主要方法是搜索周期图的峰值, 峰值的位置即对应于载波频偏^[6]。FFT 算法是频域中一种估计范围大的估计算法, 可以达到 $\pm 50\%$ 的符号速率, 而且能在很低的信噪比下工作。此外由于可以使用 FFT 变换, 实现方法简单, 在实际系统中得到了普遍应用。DFT 频域估计算法, 可以表示如式 (3) 所示, 式 (4) 和式 (5) 分别为频率和相位估计公式:

$$A(f) = \frac{2}{P} \sum_{k=0}^{P/2-1} y_k s_k^* e^{-j2\pi f n T} \quad (3)$$

$$\tilde{f}_{DFT} = \arg \max_f |A(f)| \quad (4)$$

$$\hat{\theta}_{DFT} = \arg \left\{ \sum_{k=0}^{P/2-1} y_k s_k^* e^{-j2\pi \tilde{f}_{DFT} k T} \right\} \quad (5)$$

其中： P 为导频段符号数， $n = 0, 1, \dots, N_{fft} - 1, N_{fft}$ 为 DFT 变换的点数， \tilde{f}_{DFT} 为所要估计的频偏值， $\hat{\theta}_{DFT}$ 为所要估计的相偏值。FFT 算法简单示意图如图 3 所示。

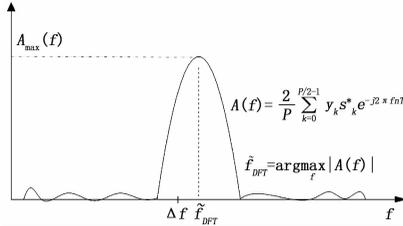


图 3 DFT 频域估计算法

如图 4 所示，二次插值估计算法的主要实现方法是在使用周期图的峰值进行粗估计的基础上，根据插值公式，使用峰值点左右两边两条谱线的幅度进行细估^[7]。根据 FFT 获得频谱能量的最大值 $A(k_m)$ 连同对应的频率点 k_m 。同时可以得到最大值 $A(k_m)$ 的左右相邻的两个值 $A(k_m - 1)$ 、 $A(k_m + 1)$ ，及其对应的频率点 $k_m - 1$ 、 $k_m + 1$ 。由三点可以构造二次曲线即： $z = ak^2 + bk + c$ ，将三点值代入，可以求得曲线最大值 k_{max} 及频偏估计值 \tilde{f}_{int} ^[8]。

$$k_{max} = k_m + \frac{3A(k_m - 1) - 4A(k_m) + A(k_m + 1)}{2A(k_m - 1) - 4A(k_m) + 2A(k_m + 1)} - 1 \quad (6)$$

$$\tilde{f}_{int} = \frac{k_{max}}{TN_{fft}} \quad (7)$$

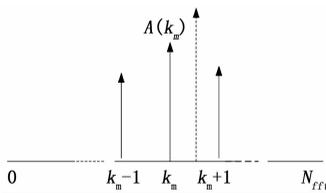


图 4 二次插值频域估计算法

3 同步算法改进

3.1 线性相位内插算法的改进

由于卫星移动通信系统中突发信号符号长度短，独特码在突发帧结构中占有的比重较少，且每一个独特码组的长度很短^[9]，导致采用常规 FFML 算法在计算独特码平均相位时，受到噪声的干扰较大，导致算法的 SNR 损失较大。这里对传统算法做了改进，改进的地方主要集中在传统算法第一步中计算出的各个独特码字段估计的相位值 $\theta(i)$ 上。

利用噪声平均化的原则，将一段段的独特码组看成一个整体，码字的加长受到噪声的干扰就会变小。假设有 3 段独特码，他们的相位分别为 phase1, phase2, phase3。

1) 按照线性的方式，可以通过 phase1, phase3 计算出 phase2_out，再通过 phase2_out 与 phase2 求平均后得到输出相位 phase2_out；

2) 通过 phase2_out 与 phase1 按照线性的方式计算出

phase3_out，然后通过 phase3 与 phase3_out 求平均后得到输出相位 phase3_out；

3) 通过 phase2_out 与 phase3_out 按照线性的方式计算出 phase1_out，然后通过 phase1 与 phase1_out 求平均后得到输出相位 phase1_out；

4) 最后将 phase1_out、phase2_out、phase3_out 替代 FFML 算法中的 phase1、phase2、phase3，然后进行相位同步。

使用改进的相位估计算法后，可以使符号个数小于 8 的独特码相位估计值受噪声的影响明显减小。仿真结果表明改进的相位估计算法可以提高系统整体性能。

3.2 频率同步算法改进

由于在卫星移动通信信道发送流程中，发送信息均做了 CRC 校验^[10]，因此我们可以利用解码后的数据做 CRC 校验，若解码信息完全正确，则可利用数据段信息和导频段信息整体做频偏估计，这样大大增加了数据量，也即保证了频偏估计的精度。在系统各个信道之间接入方式为 TDMA 时，因而改进的频偏估计策略为本帧数据进行解码且 CRC 校验正确无误后，可以用本帧整体的数据做频偏估计，这样估计的频偏准确。在两个时隙距离不是很大的情况下，可以用本帧的频偏估计结果给下一帧使用，因为短时间内，信道频偏不会剧烈变化。

4 仿真性能与分析

4.1 改进的 FFML 算法性能仿真与分析

改进的 FFML 算法在不同信噪比和不同相偏情况下相位跟踪性能仿真结果如图 5~8 所示。仿真结果表明利用改进的线性相位内插算法仿真得到的拟合相位与实际相位符合很好。

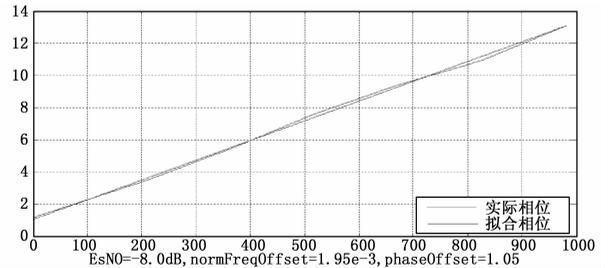


图 5 改进的 FFML 算法相位跟踪性能图

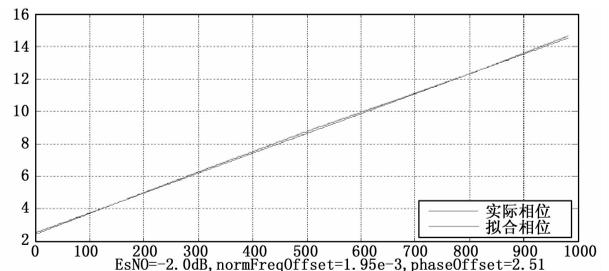


图 6 改进的 FFML 算法相位跟踪性能图

改进的 FFML 算法与原始的 FFML 算法在误码率性能上的仿真结果如图 9 所示。

由仿真结果可得，改进的 FFML 算法在相位跟踪性能上误差很小，可以使符号个数小于 8 的独特码相位估计值受噪声

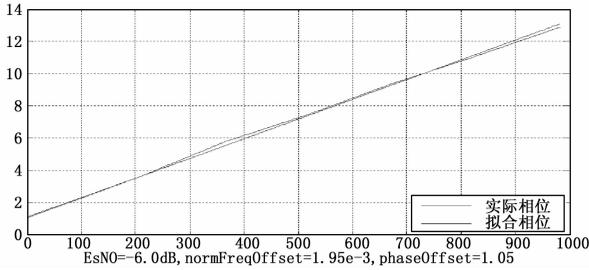


图 7 改进的 FFML 算法相位跟踪性能图

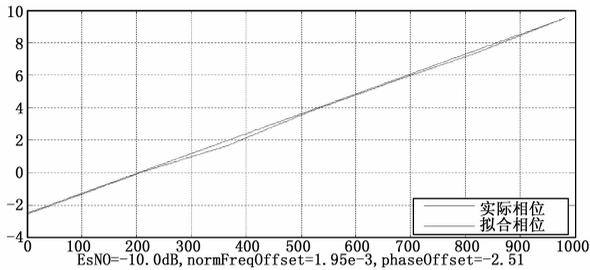


图 8 改进的 FFML 算法相位跟踪性能图

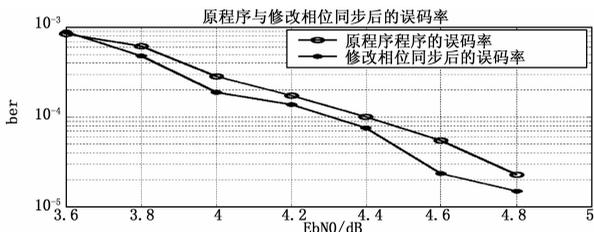


图 9 相位同步改善算法性能图

的影响明显减小, 在误码率性能上比原始算法提高很多。

4.2 频偏估计算法仿真

频域估计算法首先对接收到的信号去掉调制信息, 然后进行傅里叶变换, 找出傅里叶变换后频谱最大值的位置, 然后对傅里叶变换后的频谱最大值附近的 3 个点进行二次插值处理, 插出最大值的位置, 通过插值出的最大值位置可以计算出频偏的大小^[11]。

以 DC10 信道为例, 相位估计采用 FFML 算法, 可知相位估计所需的最大残留频偏 Δf 应满足:

$$2\pi |\Delta f| L_s T_s < \pi \quad (8)$$

所以归一化最大残留频偏应满足:

$$|\Delta f| T_s < \frac{1}{2L_s} \quad (9)$$

其中: L_s 为帧结构中相邻两个导频的最大距离。对于 DC10 信道, $L_s = 98$, 所以 DC10 信道的归一化最大残留频偏应满足:

$$|\Delta f| T_s < \frac{1}{2L_s} = \frac{1}{2 \times 98} = 0.0051 \quad (10)$$

这就要求频偏估计应该要达到这个精度。

设置符号速率为 16 ksps, 频偏加速度为 50 Hz/s, $\pi/4$ -CQPSK 调制, Turbo 码速率为 1/2, 内插倍数为 4, 仿真循环次数为 20 万次, 频偏的变化范围是 $[-8\ 000\ \text{Hz}, +8\ 000\ \text{Hz}]$, 在信道不同信噪比下的归一化最大残留频偏结果如表 2 所示。

表 2 频偏估计仿真结果

信噪比	-6dB	-5dB	-4dB	-3dB	-2dB	-1dB	0dB
归一化残留频偏	5.660	4.927	4.498	4.206	3.441	3.296	2.699
留频偏	e-4						

相应的图形曲线如图 10 所示。

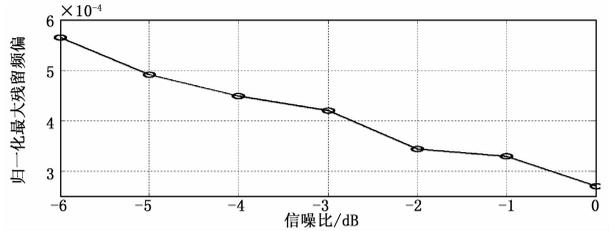


图 10 频偏估计算法性能曲线图

由图 10 中可以看出在不同信噪比情况下利用数据段信息和导频段信息整体做频偏估计及补偿所剩余的归一化最大残留频偏精度均满足式 (10) 的要求。

5 结论

针对卫星移动通信系统中突发信号符号长度短、独特码少的特点, 利用噪声平均化原则, 本文提出了改进的线性相位内插算法, 同时提出了一种频偏估计方法; 通过仿真可以看出改进的相位同步算法比传统算法性能提高, 频偏估计算法符合精度要求。

参考文献:

- [1] 赵乐, 宋爱民, 刘剑, 等. W 频段卫星通信中的恒包络 OFDM 技术 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (8): 2660-2662.
- [2] 张骏凌, 王睦重, 苏莉, 等. 多载波 CDMA 系统中的频域线性相位内插算法 [J]. 通信学报, 2002, 23 (4): 82-90.
- [3] 蒋伟, 乐天. 基于插值的多普勒频偏和频率斜率联合估计算法 [J]. 电子与信息学报, 2013, 35 (1): 166-171.
- [4] 袁建国, 邱飘玉, 王竞鑫, 等. CO-OFDM 系统中一种改进的基于线性内插的相位噪声补偿算法 [J]. 半导体光电, 2016, 37 (5): 716-720.
- [5] 曹家华. 突发通信中的载波同步技术研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
- [6] 陈健, 唐杰, 李明齐. NGB-W 广播信道估计实现算法设计 [J]. 电视技术, 2016, 40 (10): 131-136.
- [7] 丁玉杰. 低信噪比短突发通信系统下载波频偏估计算法研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
- [8] 李骥. 低载噪比高动态信号相位估计方法研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
- [9] 闫昆. HSPA+ 系统频偏估计的研究与实现 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2012.
- [10] 王茜. 复杂宽带信号多参数估计算法研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2015.
- [11] 黄海钰. DVB-S2 接收机载波同步算法研究与实现 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014.
- [12] 张少侃, 林家群, 吕聪敏. 频偏估计方法与系统 [P]. 中国专利: 106059973, 2016-10-26.