2017 年 10 月 Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology

文章编号: 2095-4980(2017)05-0763-06

一种适用于极低信噪比环境的迭代同步方案

杨 杰,李广侠,朱宏鹏

(解放军理工大学 通信工程学院, 江苏 南京 210000)

摘 要:卫星通信、深空通信等应用要求接收机在很低信噪比下工作。近年来研究热点基于 码辅助同步算法能够利用编码间依赖关系提高参数估计性能,以实现正确解调。本文以码辅助同 步算法为基础,综合分析同步各环节参数估计需求,设计较短帧头的帧格式,提出了一种完整的 迭代接收机结构。同时精心选择预估计算法,将定时偏差、载波频偏压缩到很窄范围。最后对码 辅助算法迭代复杂度高的问题进行了优化。仿真表明,在极低信噪比下,该结构同步性能良好, 复杂度低,传输效率高。

关键词:极低信噪比;同步;码辅助算法 中图分类号:TN911.7 文献标志码:A doi: 10.11805/TKYDA201705.0763

YANG Jie, LI Guangxia, ZHU Hongpeng

An iterative synchronization scheme for very low SNR environment

(College of Communication Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing Jiangsu 210000, China)

Abstract: Satellite communication and deep space communication require the receiver to operate at very low Signal to Noise Ratio(SNR). Code-aided synchronization algorithm which is a hot research area in recent years can improve estimation performance of parameters by using inter-coding dependencies so as to achieve correct demodulation. Based on the existing code-aided synchronization algorithms, the estimation requirements of parameters are analyzed synthetically, and a complete receiver structure with short frame header is designed. A predictive algorithm is carefully selected to compress the timing and carrier offset to a narrow range. The computation complexity of the iterative decoding algorithm is decreased. The simulation results show that the proposed scheme has good synchronization performance, low complexity and high transmission efficiency at very low SNR modes.

Keywords: very low SNR; synchronization; code-aided algorithm

卫星通信正朝向大容量、终端小型化、移动化等方向发展,要求接收机在很低信噪比下工作,而低信噪比 条件对接收机的同步带来了挑战,传统的参数估计算法在低信噪比时估计性能恶化严重,解决通信系统在低信 噪比条件下的同步问题具有重要意义。实现低信噪比下同步,主要有 3 种方式。第一种是对传统的非数据辅助 算法进行修正,如增加观察区间或缩小环路滤波带宽。但在极低信噪比下,要求环路带宽非常窄,硬件实现很 困难。第二种是插入导频法,可在一定条件下逼近修正克拉美罗界(Modified Cramer-Rao Bound, MCRB)^[1]。但 由 MCRB 界公式可知,在低信噪比条件下,为达到所需的估计精确度,需要大量的导频符号。2014年,数字视 频广播(Digital Video Broadcasting, DVB)组织发布的 DVB-S2X 标准中提供了 VL-SNR 模式,可在-10dB 的信噪 比条件下工作^[2],但帧头长度为 720 个符号,频带利用率不高。第三种方法,不同于传统接收机中的同步和译 码过程分开进行,而是将两者联合起来。Turbo码、LDPC 码等高级编码算法使得信息帧符号流之间存在依赖关 系,利用这些依赖关系来辅助进行同步,则可以等效于加长观测区间,进而提高估计精确度。因此,可将参数 估计与 Turbo码、LDPC 码等的译码结合起来,利用译码器输出的软信息辅助参数估计,并在新估计的参数基 础上再次进行译码,两者相互促进,共同收敛,完成参数的精确估计和译码。目前,已经有相当多的文献对此 进行研究,但主要集中在单一参数估计算法改进^[3],对于接收机的具体实现结构研究较少。文献[4]提出接收机 设计方案中,帧头需要 1 024 个符号辅助完成同步,导频符号过长,且迭代次数多,复杂度高。本文综合考虑 接收机各个同步环节,用 1/6 码率 Turbo 编码,提出完整的迭代接收机结构,对迭代译码复杂性进行优化。

1 信号模型及帧结构

1.1 信号模型

高斯白噪声卫星信道,BPSK 调制。经过滤波整型后的信号可表示为:

$$r(t) = \sum a_k g(t - kT_s - (\tau_0 + k\Delta T))e^{j(2\pi\Delta f(+q_k))} + n(t)$$
(1)

式中: $\{a_k\}$ 表示发送信号; g(t)是根升余弦成型滤波器; T_a 表示符号周期; τ_a 表示定时偏差; ΔT 表示定时频 偏; φ_k 表示载波相位偏差; Δf 表示载波频率偏差; n(t)表示加性独立高斯白噪声。

1.2 帧结构设计

太空数据系统咨询委员会(Consultative Committee for Space Data Systems, CCSDS)标准为空间通信提供了标准的通信体系结构。帧结构设计参考 CCSDS 的帧格式标准,如图 1 所示。该结构实现简单,易于后续模块处理。帧头长度的选择主要考虑用于帧同步检测以及作为后续参数估计中数据辅助的能力。帧头长度越长,检测能力越高,但传输效率相应降低。图 2 给出了基于互相关算法的不同帧同步头长度的帧同步检测性能。可以看到, *R*_{SN} = -6 dB 时, 192 个符号和 256 个符号的帧头检测概率接近 100%。需要指出的是,图 2 的性能是在理想条件下(无载波频偏、定时偏移)得到的,考虑到残留频偏会导致性能损失,应留有 2~3 dB 余量,因此同步头长度定为 256 bit,这里同步头长度选取仅从帧同步角度考虑,后续设计将进一步验证该长度的可行性。

2 接收机设计

2.1 接收机结构

在数字接收机中,参数的估计主要有载波频率 Δf 、相位 φ_k 、定时偏差 τ_0 、定时频偏 ΔT ,帧头位置 μ 。在传统接收机中,由于信噪比较高,各个 模块的估计精确度均可以达到很高,前一参数的估计不影响后续参数的估计,系统可以按照顺序方式工作。而在在极低信噪比模式下,每一参数的估计完成后会有残留偏差,这个偏差对后续参数估计的影响不可忽略。因此,设计接收机既要考虑到参数同步的顺序,也要综合考虑估计算法对其 他参数的敏感程度。

另外,长 Turbo 码对于频偏很敏感。频偏过大,则一帧中相位翻转的数 量较多,译码的错误概率将会迅速增加。由图 3 可看到,采用 1/6 码率的 Turbo 码(1 960,11 760),频偏(Δf·T_s)超过 6×10⁻⁶ 后,误码率迅速下降。因 此,在进行迭代解调前,首先要压缩频偏至很窄范围。

基于此,本文综合考虑各个参数的影响,提出了系统的模型框架,如图 4 所示。下面按照同步顺序分析各 子模块实现方法。



Fig.4 Block diagram of receiver framework 图 4 迭代接收机实现框图



2.2 帧同步和定时粗估计

杨

2.2.1 联合估计方案

传统接收机,位定时先于帧同步完成,帧同步可在最佳采样点工作。而极低信噪比环境给位定时的建立带 来了困难。经典的 Gardner 算法^[5]可以工作在很低的门限,并能容忍小频偏,但建立时间很长,特别是对于定 时频偏较大的情况,所需时间更长^[2]。因此,为实现快速建立同步的要求,类似 DVB-S2X 同步方案^[6],本文设 计了一种改进的同步算法。

首先,由于导频符号较短,对于较小的定时频偏,可以认为该区间内定时偏差恒定。进而,按照最大似然 准则,对定时偏差τ₀和帧头位置μ联合估计。具体实现为,采用 N 倍速率采样(8 倍以上),分别送到帧同步检 测单元搜索相关峰最大值,则 N 段中的最大值所在偏移区间即为定时偏移所在区间,最大值所在位置则判断为 帧头起始位置。同时,可利用捕获的相邻同步头压缩定时频偏。这里,N的选择直接决定定时频偏压缩范围。

图 5 为帧长为 10 000,采用联合估计算法进行定时频偏粗估计的示意图。其中,箭头所指位置为实际最佳 采样点,红色粗短线表示估计的采样位置。对于第 *M* 帧来说,联合估计出的 2 个参数为: $\mu_m = 2, \tau_m = \frac{2}{N}T$,对 于第 *M*+1 帧来说,联合估计出的 2 个参数为: $\mu_{m+1} = 3, \tau_{m+1} = \frac{8}{N}T$ 。由于 $\mu_m \neq \mu_{m+1}$,假定帧同步检测概率接近 100%,则由于定时频偏的影响,连续 2 帧出现了滑码。由图 5 可算出,实际定时频偏为:



当 N=8 时, $f_{ideal} = 12.5 \text{ ppm}$, 当 N=16 时, $f_{ideal} = 6.25 \text{ ppm}$ 。考虑到最极端的情况,即对于图 5 来说,连续 2 帧实际最佳采样点分别为 $\frac{3}{N}T$ 和 $\frac{7}{N}T$,则频偏压缩到 $f_{res} = \frac{200}{N}$ ppm,这时对于 N=8 时, $f_{ideal} = 25 \text{ ppm}$,当 N=16 时, $f_{ideal} = 12.5 \text{ ppm}$,则频偏可以大幅压缩。经过频偏修正后,再采用 Gardner 算法跟踪定位时,则同步时间可以大大缩短。由于有残留定时频偏,选择二阶环路滤波器来跟踪频偏。

2.2.2 帧同步检测单元

接收到的信号由于多普勒运动的影响,会存在频偏。这就要求帧同步检测模块应能容忍频偏。互相关算法 对相位偏移不敏感,但对于频率偏移非常敏感,当接收信号序列存在载波频偏时,将会在每个接收样点符号的 相位中引入一个呈线性变化的干扰,导致接收信号序列与本地序列的互相关峰值随载波频偏增大而减小,严重 时甚至会减小至接近于 0。差分相关算法可以容忍频偏,实现复杂度低,但由于差分运算会对噪声累积,在低 信噪比下会有 4~5 dB 性能损失。文献[7]提出了 3 种基于 PDI 算法的帧同步检测方法,如图 6 所示。

上面提到的4种检测算法可以表示为:



式中: c_k表示帧同步头序列; n 表示接收的符号; L_{sor}表示帧同步的长度; M 表示每段的长度, M 的取值需要 通过仿真优化选择。图 7 比较了 4 种检测器的性能, 仿真参数设置如下: 残留频偏为符号速率的 8%, M=4,

L=256。可以看到, DPDI-Abs 算法在很低信噪比下检测性能最佳。因此, 帧同步检测单元采用该算法。

2.3 频率精估计

为进一步压缩频偏范围,可以利用数据辅助方法将频偏进一步压缩。由于帧头长度有限,在现有的频偏估计算法中,应尽可能选择逼近MCRB界的算法。频偏估计算法主要有时域估计算法和频域估计算法。 相较前者,频域估计算法可以适应更大的估计范围。频域估计算法主要 是通过查找FFT运算后幅度最大的谱线来进行频率估计,由于FFT运算 的"栅栏"效应,当实际频率落入"栅栏"之间时会产生较大的估计误差。 由于FFT后谱线包络类似于"sinc"特性,可采用插值方法解决这一问题。选择三角插值算法^[8]可完成频率和相位的联合估计。从图 8 中可看 出,*R*_{SN} = -6 dB时,频率估计方差为 8.5×10⁻⁸,即标准差为 290 ppm,可 以满足后续迭代需求。

2.4 迭代译码解调

经过前面的参数估计环节,定时偏差、载波相位、频率偏差均在迭代 译码算法收敛范围内,可以利用迭代解调方法对同步精确度进一步压缩, 进而确保译码性能不损失。文献[9]首先通过分析说明同步偏差对接收信号 的影响综合表现为接收信号 SNR 的降低,而后根据密度进化理论和高斯逼 近理论分析得到信号的 SNR 越大,信号的后验 LLR 绝对值的和越大的结 论。则可以把参数估计转化为求取目标似然函数的最大值。

定义目标似然函数为:

$$\varphi(s) = \sum \left| LLR[Q_k^{(l)} \mid s] \right| \tag{9}$$

式中: *s* 为同步参数集合 {*v*,*τ*} 或 {*w*, θ }, *LLR*[$Q_k^{(l)}|s$]表示经过 *l* 次迭代后第 *k* 个比特的对数似然比,对于 Turbo 来说就是译码输出的软信息值。

文献[10-12]只研究了单一参数估计, 而完成译码需对载波频率、载波 相位、定时偏移 3 种参数进行估计。直接在三维空间中搜索最优值精确度 最高, 但所需迭代次数非常高。为降低复杂度, 提出 2 种优化方案。

1) 图 9(a)给出了无频偏和有频偏时目标函数与相位偏差的关系曲线。 图 9(b)给出了无相偏和有相偏时目标函数与频率偏差的关系曲线。由仿真结 果可知,参数间的依赖程度不一致。定时偏移和相偏对频偏很敏感,而频 偏对定时偏移和相偏不敏感。因此,如图 4 所示,可先对频偏进行估计, 然后对相偏和定时偏移分别进行估计。这样,可以极大减少迭代次数。

2) 在帧头捕获阶段,多个连续帧头检测出后方认为完成同步捕获。因此,可以事先存储多帧帧头用于数据辅助频率精估计。连续 2 帧中, fi表示前一帧真实频率; fi表示相应的频率估计值, f2表示后一帧真实频率, f2表示相应的频率估计值。假设频率估计值服从高斯分布,由于观测区间 长度一致,则估计方差相等。因此,

$$\tilde{f}_1 \sim N(f_1, \sigma^2) \tag{10}$$
$$\tilde{f}_2 \sim N(f_2, \sigma^2) \tag{11}$$

$$f_2 \sim N(f_2, \sigma^2)$$

利用连续2帧帧头进行精估计, f3表示估计值, f3表示估计均值, 则

$$\tilde{f}_3 = \frac{\tilde{f}_1 + \tilde{f}_2}{2} \sim N(f_3, \sigma_3^2) = N(\frac{f_1 + f_2}{2}, \frac{\sigma^2}{2})$$
(12)

由 2.3 节知, $E_s/N_0 = -6$ dB时, $\sigma = 290$ ppm, 假定连续 2 帧帧头频偏变 化 $\Delta f = f_2 - f_1 = 10$ ppm (这在实际中可以适应较大动态),则



Fig.7 Performance comparison of four kinds of frame synchronization detection algorithms 图 7 四种帧同步检测算法性能比较



图 8 三角插值算法频率估计性能曲线



Fig.9 Objective function versus phase errors and versus frequency errors图 9 目标函数与相位偏差、频率偏差

$$\Delta f / \sigma = 1/30 \Rightarrow \tilde{f}_3 \sim N(f_3, \sigma_3^2) \approx N(f_1, \frac{\sigma^2}{2}) \Rightarrow \sigma_3 = \sqrt{2}\sigma/2$$
因此,送入译码器的频率偏移范围可以进一步压缩,迭代次数相应进一步减少。

3 仿真分析

采用图 4 所示的接收机结构, 仿真环境为:高斯白噪声信道, BPSK 调制 方式,采用 1/6 码率的 Turbo 码(1960,11760), 在帧同步检测模块中采用 N=16倍速率采样。估计参数设置为: $\Delta \theta = 30^{\circ}$, $\Delta f = 2 f_{d}$, $\tau = 0.1T_{s}$, 其中, f_{d} 表 示符号速率, T_{s} 表示符号周期。

图 10 是采用本文提出的结构经过 10 000 次仿真得到的误码率仿真曲线。 对比理想同步情况下误码率曲线,本文提出的方案在很低信噪比下性能损失 约 0.2 dB,损失较小。仿真结果也表明帧头长度定为 256 个符号能够满足同 步需要。



4 结论

本文综合考虑各个估计参数的影响,提出了一种完整的迭代接收机框架,可以有效解决极低信噪比下同步 问题,对比文献[2]和文献[4]的结构,帧头长度大幅缩短,传输效率较高,并能适应较大频偏,具有一定的实用 价值。

参考文献:

- NOELS N, STEENDAM H, MOENECLAEY M. Carrier and clock recovery in (turbo) coded systems Cramer-Rao bound and synchronizer performance[J]. EURASIP Journal on Applied Signal Processing, 2005(6):972-980.
- [2] European Telecommunications Standards Institute. Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications; Part II (DVB-S2X): ETSI EN 302 307-2 (V1.1.1)[S]. Digital Video Broadcasting (DVB), 2014.
- [3] 万增然,詹亚锋.用于深空通信的译码辅助同步算法[C]// 中国宇航学会深空探测技术专业委员会(CDSET-CSA)学术年会.北京:CDSET-CSA, 2010:16-22. (WAN Zengran,ZHAN Yafeng. Code-aided synchronization algorithm for deep space communications[C]// Annual Academic Conference organized by the Committee of Deep Space Exploration Technology, Chinese Society of Astronautics(CDSET-CSA). Beijing:CDSET-CSA, 2010:16-22.)
- [4] WAN Zengran, ZHAN Yafeng, WU Jianqiang, et al. A receiver structure of joint LDPC decoding and synchronization for deep space communications[C]// Wireless Communications Networking and Mobile Computing. Chengdu, China: IEEE, 2010.
- [5] 宋青平,刘荣科,段瑞枫. 一种用于全数字接收机的位同步算法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015,13(3):436–440. (SONG Qingping,LIU Rongke,DUAN Ruifeng. A symbol timing synchronization algorithm for all digital receiver[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2015,13(3):436–440.)
- [6] ROHDE C,ALAGHA N,DE GAUDENZI R,et al. Super-framing: a powerful physical layer frame structure for next generation satellite broadband systems[J]. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2016(34):323-325.
- [7] VILLANTI M,SALMI P,CORAZZA G E. Differential post detection integration techniques for robust code acquisition[J]. IEEE Transactions on Communications, 2007,55(11):2172-2184.
- [8] ZHAN Ye,XU Guangfei,GUO Daoxing. An accurate estimation algorithm of frequency and phase at low signal-noise ratio levels[C]// International Conference on Wireless Communications and Signal Processing. Suzhou,China:IEEE, 2010:1-5.
- [9] CHUNG S Y, RICHARDSON T, URBANKE R L. Analysis of sum-product decoding of low-density parity-check codes using a Gaussian approximation[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2001,47(2):657-670.
- [10] FREEDMAN A,RAHAMIM Y,REICHMAN A. Maximum-mean-square soft output (M2S2O): a method for carrier synchronization of short burst Turbo coded signals[J]. IEEE Proceedings of Communications, 2006,153(4):245-255.
- [11] HERZET C. Code-aided synchronization for digital burst communications[D]. Belgium:University Catholique de Louvain (UCL), 2006.
- [12] ZHANG L,BURR A. Iterative carrier phase recovery suited to Turbo-coded systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2004,3(6):2267-2276.

767

(13)

作者简介:



杨杰(1989-),男,河南省济源市人, 在读硕士研究生,主要研究方向为卫星通信调 制编码.email:yi_csu@126.com. **李广侠**(1964-),男,南京市人,硕士,博 士生导师,教授,主要研究方向为卫星通信、 导航.

朱宏鹏(1982-),男,南京市人,博士,讲师,主要研究方向为卫星通信信道编码.



关于举办 2017 全国图像图形处理技术应用大会

暨 2017 中国图像图形处理技术工程师年会的通知

自 2013 年中国电子学会成功地举办了 4 届 "全国图形图像处理技术应用大会暨中国全国图 形图像处理工程师年会",会议受到广大参会代表的好评。为此,中国电子学会拟于 2017 年 11 月继续在北京举办 "2017 年全国图像图形处理技术应用大会暨 2017 中国图像图形处理工程师 年会",本次会议较几届大会报告内容更加丰富,更加集中,旨在进一步加强图像图形处理技术 应用领域中企业之间、高校与企业之间、研发工程师与应用工程师之间的交流和沟通,有力推 动图像图形处理技术的进步与应用水平的长足进展,以满足各个行业的发展需求。现就有关事 项通知如下:

一、大会主题:拓宽研发思路 提高应用能力

- 二、时间地点: 2017年11月17~19日;17日报到;地点:北京
- 三、主办单位:中国电子学会

媒体支持:中国图象图形学报、太赫兹科学与电子信息学报、模式识别与人工智能、雷达学报

四、大会主席: 张勇东 中科院计算所

五、大会交流形式

1.特邀演讲:大会将邀请国内图像图形处理技术领域的著名专家,就图像图形处理技术的应用和最新动态做特邀报告。
 2.宣传展示:邀请图像图形技术相关科研单位和高新技术企业,宣传展示他们在图像图形技术领域的研究成果、新

产品和市场化内容。

3.大会发表的新成果、新产品、新技术及研究报告

六、拟邀请大会报告人: 陈定佳(北京快手公司); 操晓春(中国科学院信息工程研究所研究员); 俞 俊(杭州电子科 技大学教授); 聂礼强(山东大学); 白翔(华中科技大学); 查正军(中国科技大学); 程 健(中科院自动化所); 林巍峣 (上海交通大学); 陈震中(武汉大学教授); 马思伟(北京大学信息科学技术学院教授); 颜 波(复旦大学计算机科学 技术学院教授); 索津莉(清华大学自动化系副教授、博士生导师); 夏时洪(中国科学院计算技术研究所研究员)

七、参会人员:1.国内外知名企业研发和工程技术人员;2.国内外大、专院校科研技术人员;3.行业组织、研究机构、应用工程单位等;4.新闻媒体代表

八、会务事项:收费标准1980元/人,会议期间食宿统一安排,费用自理。

九、会务组联系方式

1.会议报名及招商合作咨询:中国电子学会 骆阳 010-83687508; 手机: 13521652196(同微信);

email: ly_job@163.com; QQ:419304516

2.收款单位: 中国电子学会 开户行: 工行北京公主坟支行

账 号: 9558 8502 0000 0514 849 (汇款注明单位+参会人员姓名)

中国电子学会 2017年9月