

文章编号: 1673-9469 (2017) 03-0105-04

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2017.03.023

卫星移动通信系统中 Turbo 均衡性能研究

陈金伦, 郝学坤, 王力男

(中国电子科技集团公司第五十四研究所, 河北石家庄 050081)

摘要: 针对我国天通卫星移动通信系统的传输特点, 提出利用 Turbo 均衡以达到消除衰落信道下码间干扰的目的, 针对 Turbo 均衡 Log-MAP 算法对信噪比的估计值具有敏感性, 提出一种新的信噪比估计方法。根据天通系统特点, 利用线性调频 (Chirp) 信号估计出信噪比值, 从而为 Turbo 均衡器提供准确的信噪比参数, 保证均衡器良好的性能。仿真结果表明: 利用 Chirp 信号估计的信噪比误差能保证在 0.2 dB 范围内, 系统在 3 dB 时误码率可以达到 10^{-3} 。

关键词: 卫星移动通信; 莱斯信道; Turbo 均衡; 信噪比估计

中图分类号: TN927

文献标识码: A

Performance analysis of Turbo equalization under satellite mobile communication system

CHEN Jinlun, HAO Xuekun, WANG Linan

(THE 54TH RESEARCH INSTITUTE OF CETC, Shijiazhuang Hebei, 050081, China)

Abstract: For the Tiantong mobile satellite communication, we propose a turbo equalization to remove ISI. However, the Log-MAP algorithm is sensitive to SNR estimation. Aiming at this problem, we propose a method of SNR estimation based on Chirp signal in FCCH of Tiantong system to ensure the performance of turbo equalizer. The simulation results show: SNR estimation error range of 0.2 dB can be ensured and BER can reach 10^{-3} under condition of 3 dB Eb/N0.

Key words: mobile satellite; Rician channel; Turbo equalization; SNR estimation.

在莱斯信道环境下, 信号经历各种衰落, 存在码间干扰 (ISI), 接收性能恶化等情况。均衡技术是解决 ISI 关键技术, 是接收机中不可缺少的功能。在国外相对成熟的卫星移动系统中 (如美国的 Thuraya 系统) 采用的是均衡措施为 LS 信道估计^[1], 这种方法比较简单, 但其性能较差, 在 Eb/N0 为 3 dB 时 BER 还不到 10^{-2} , 在国内, 卫星移动产业刚刚兴起, 有人提出了二次均衡的方法^[2]。1995 年 Douillard 等人将 Turbo 原理推广应用到信道均衡领域^[3], 基于 Log-MAP 算法的 Turbo 对信噪比的估计值有一定的敏感性, 文献 [4] 通过固定信噪比偏差分析了算法对信噪比的敏感度, 但并没有解决如何获得准确信噪比值的问题, 后来, 李强等人提出了基于 SMLM 算法的估计信道 SNR 的方法^[5]。在

此, 我们对该算法在卫星移动信道下对信噪比的敏感度做出了分析, 并针对天通卫星的体制提出了一种利用频率校正信道 (Frequency Control Channel, FCCH) 信号估计信噪比的方法。

1 Turbo 均衡原理

假设发送端信号为 $x(k)=[x_0, x_1, \dots, x_{k-1}]$, 经过莱斯信道传输后, 接收信号可以表示为

$$z_k = a_k x_{k-m} + \omega_k \quad (1)$$

其中, a_k 是衰落因子; ω_k 是 K 时刻的加性噪声。

Turbo 均衡的基本思想就是将 Turbo 译码原理和均衡技术相结合, 迭代交换外信息, 充分利用编码冗余。最开始, 均衡模块并没有任何比特的先验信息,

收稿日期: 2017-05-23

基金项目: 国家科技重大专项 (2013ZX03006004)

作者简介: 陈金伦 (1991-), 男, 山东青州人, 硕士, 主要从事信号信息处理方向的研究。

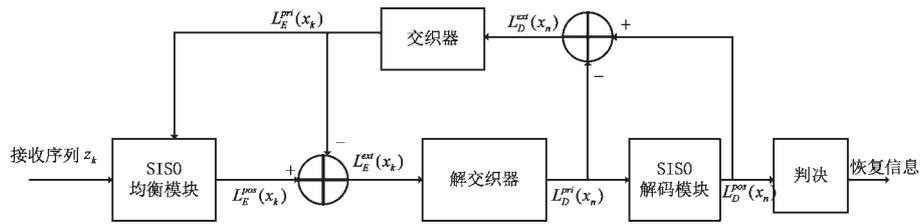


图1 Turbo 均衡接收端模型
Fig.1 Receiver model of Turbo equalization

均衡器的先验初始值 $L_E^{pri}(x_k)$ 为零；均衡模块通过输入信息和均衡算法得到编码比特的后验信息 $L_E^{pos}(x_k)$ ，扣掉先验信息得到均衡模块的外部信息值 $L_E^{ext}(x_k)$ 后，经过解交织作为解码模块的先验信息 $L_D^{pri}(x_n)$ ；在解码模块进行 Turbo 码的译码，把得到的比特外部信息 $L_D^{ext}(x_n)$ 交织后送到均衡。这样，经过一次迭代后，均衡模块的先验信息不再为零，已经获得了一些信道的信息，经过多次迭代后，若达到停止迭代的条件，进行判决，输出信息值(图1)。

2 Turbo 均衡算法

Turbo 均衡最优的算法是最大后验概率 (MAP) 算法，MAP 算法试图在得到观测序列 y 的前提下，寻找每一时刻最有可能的发送消息，表示为后验对数似然比函数，即

$$L_D^{pos}(x_k^s) = \ln \frac{\sum_{s_k} \sum_{s_{k-1}} \gamma_1[y_k, S_k, S_{k-1}] \cdot \alpha_{k-1}(S_{k-1}) \cdot \beta_k(S_k)}{\sum_{s_k} \sum_{s_{k-1}} \gamma_0[y_k, S_k, S_{k-1}] \cdot \alpha_{k-1}(S_{k-1}) \cdot \beta_k(S_k)} \quad (2)$$

其中 α 、 β 、 γ 分别代表前向状态测度、后向状态测度和分支测度。

在 MAP 算法中涉及到大量的对数、指数和乘法运算，实现复杂度高，因此，在实际接收机系统中，常在对数域进行计算，即 Log-MAP 算法，大大降低了复杂度，将分支测度取自然对数：

$$\ln \gamma_i(y_k, S_k, S_{k-1}) = \frac{2E_s}{N_0} y_k^s x_k^s(i) + \frac{2E_s}{N_0} y_k^p x_k^p(i, S_k, S_{k-1}) + \ln \Pr(d_k = i) + K \quad (3)$$

上式中，信息比特的内部信息是第一项和第三项，第二项为校验比特的信息，是外部信息，常数项 K 可以舍去。

对于前向状态测度和后向状态测度也分别取自然对数：

$$\ln \alpha_k(S_k) = \ln \sum_{S_{k-1}} \sum_{i=0,1} \exp \{ \ln \gamma_i(y_k, S_k, S_{k-1}) + \ln \alpha_{k-1}(S_{k-1}) \} \quad (4)$$

$$\ln \beta_k(S_k) = \ln \sum_{S_{k+1}} \sum_{i=0,1} \exp \{ \ln \gamma_i(y_{k+1}, S_k, S_{k+1}) + \ln \alpha_{k+1}(S_{k+1}) \} \quad (5)$$

其近似后的对数似然函数表达式变为

$$L_D^{pos}(x_k^s) = \max_{(s_k, s_{k-1})} (\ln \gamma_1[y_k, s_k, s_{k-1}] + \ln \alpha_{k-1}(s_{k-1}) + \ln \beta_k(s_k)) - \max_{(s_k, s_{k-1})} (\ln \gamma_0[y_k, s_k, s_{k-1}] + \ln \alpha_{k-1}(s_{k-1}) + \ln \beta_k(s_k)) \quad (6)$$

由于 E_s/N_0 在式 (3) 中参与了运算，因此在式 (4)、(5)、(6) 中也会受到影响。在文献 [6] 中从理论上近似分析了 Log-MAP 算法对信噪比的敏感度，由于 Turbo 迭代译码过程是较复杂的非线性过程，很难通过数学模型来分析 Log-MAP 算法对信噪比的敏感程度，有人提出了很多的研究方法和工具，最常见的是基于蒙特卡罗仿真的方法，通过固定信噪比偏差来计算 BER 性能，从而得到该算法对信噪比敏感度。下面将通过仿真分析 Log-MAP 算法在莱斯信道下对信噪比的敏感度。

仿真条件：帧长 1 024 bit；以多项式 $(1+D^2)/(1+D+D^2)$ 生成编码；编码率为 1/2；调制方式为 BPSK 调制；均衡算法采用 Log-MAP，迭代次数为 6 次；信道模型为上述 K 因子为 7 的莱斯信道。

仿真结果：由图 2 可以看出在莱斯信道下算法的性能受信噪比估计偏差影响还是很大的，当估计误差绝对值达到 2 db 时，均衡性能急剧恶化，相对高估信噪比来说，低估的信噪比对 Log-MAP 性能影响更大。因此，为了保证算法的优异性能，必须要有一个准确的估计器为算法提供信噪比估计参数。

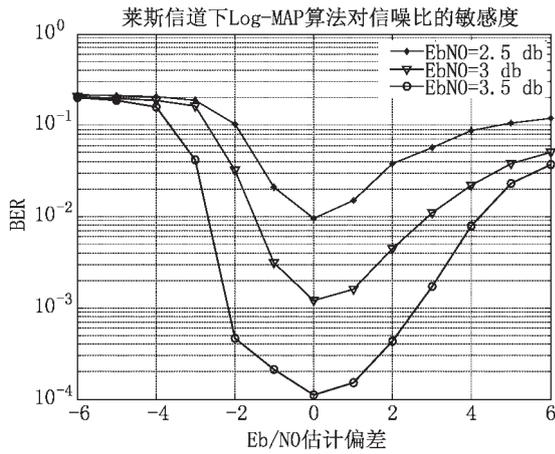


图2 不同信噪比估计偏差下的误码率曲线
Fig.2 BER performance in different SNR offset

3 信噪比估计单元的设计

信噪比估计对于无线通信的可靠稳定有着很重要的作用，文献 [7] 分析了各种估计算法的性能，但这些方法对不同的调制方式、采样倍数适应性不一，同时受频偏影响较大。因此，我们提出基于 Chirp 信号的信噪比估计方法，FCCH 承载频率校正信息，每隔固定帧数循环一次，对频偏、噪声不是很敏感，使移动终端能获得准确的频率信息，其表达式为

$$s(t) = \cos(2\pi f_0 t + \mu t^2), \quad t \in (0, T) \quad (7)$$

其中， f_0 为信号的初始频率； μ 是调频斜率； T 为信号区间。

Chirp 信号在通信信号之前，并且是隔几帧就会重复，相隔时间很短，这数帧信号之间信噪比的变化很小，或者是不变的，将这段间隔的 Chirp 信号作为导频信号来估计信噪比值，作为这段时间间隔内信号的信噪比值，这样可以利用 Chirp 信号良好的估计性提供准确的信噪比值，而且极大地降低了复杂度。

在接收端，信噪比估计器处理框图如图 3 示。

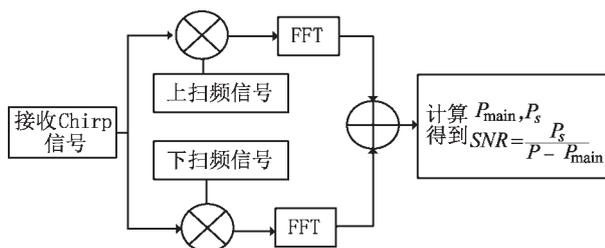


图3 Chirp 信号估计信噪比的流程图
Fig.3 Flow diagram of SNR estimation by Chirp signal

在接收端，通过两个相关器和相关信号进行处理，上、下扫频信号，分别定义为

$$d_1(t) = e^{j(2\pi f_c t + \mu t^2)}, \quad t \in (0, T) \quad (8)$$

$$d_2(t) = e^{-j(2\pi f_c t + \mu t^2)}, \quad t \in (0, T) \quad (9)$$

与接收信号作相关，然后做 N 点 FFT 变换，求得所有频率分量的幅值，其能量和为

$$P = \sum (|\text{FFT}(f_{\text{up}})|^2) + \sum (|\text{FFT}(f_{\text{down}})|^2) \quad (10)$$

假设接收信号没有频偏和延时，经过上、下扫频、 N 点 FFT 变换之后，接收信号的能量主要集中在最大相关值附近，取最大相关值附近 M 个点的和，求得信号主瓣的能量：

$$P_{\text{main}} = P_{\text{up main}} + P_{\text{down main}} = \sum (|\text{FFT}(f_{\text{up}})|^2) + \sum (|\text{FFT}(f_{\text{down max}})|^2) \quad (11)$$

然后用总能量之和减去主瓣能量，便得到其他点的噪声能量和，以此取均值得到噪声能量的平均分布。

$$P_{n \text{ avg}} = (P - P_{\text{main}}) / (N - M) \quad (12)$$

主瓣的能量减去主瓣区间内噪声的能量就是信号本身的能量值，即

$$P_s = (P_{\text{main}} - P_{n \text{ avg}}) / M \quad (13)$$

这样，就得到了信噪比的计算公式：

$$\text{SNR} = \frac{P_s}{P - P_{\text{main}}} \quad (14)$$

图 4 通过仿真说明了本文的信噪比估计方法在不同的莱斯因子 K 下信噪比的估计性能，由此可以看出，该方法可以保证信噪比估计误差在 ± 0.2 dB 范围内，即使是在瑞利信道低信噪比的条件下，该方法依然可以保证准确的信噪比估计值，这样，Log-MAP 算法就能获得可靠的信道置信度。图 5 说明了该方法提供噪比估计值后 Log-MAP 算法在 $K=9$

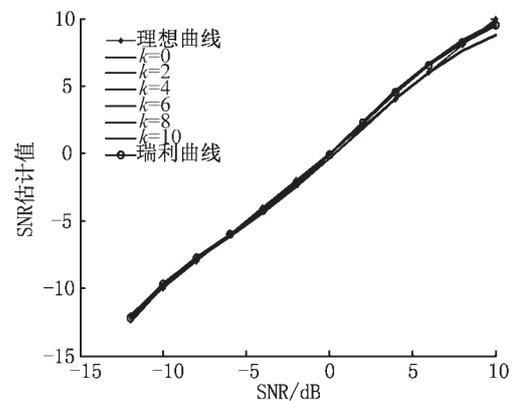


图4 不同 K 值下的信噪比估计性能
Fig.4 Performance of SNR estimation under under different K factors

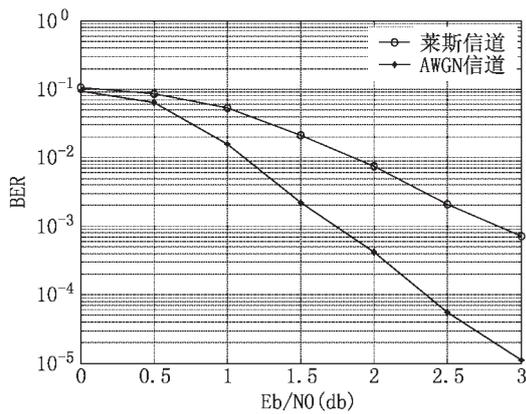


图5 Log-MAP算法在莱斯信道下的性能($K=9$)
Fig.5 Performance of Log-MAP arithmetic Rician channel($K=9$)

莱斯信道下的性能曲线,可以看出在3 dB信噪比时,误码率就可以达到 10^{-3} ,保证了Turbo均衡的性能。

4 结论

我国自主研发的卫星移动通信系统中,在莱斯信道条件下,基于Log-MAP算法的Turbo均衡器的性能,证明了该算法的性能依赖于信噪比估计值的准确度,高估或者低估信噪比值都会影响算法的性能,信噪比估计参数对算法的影响主要体现在 γ 的计算上,在 α 、 β 的递推过程中进而受到影响并最终

影响后验概率值。为了保证Log-MAP算法的性能,本文设计了基于Chirp信号的低复杂度信噪比估计器,能够保证估计值误差能在 ± 0.2 dB范围内,为算法提供精确的信噪比估计参数,可以保证算法的性能,为Turbo均衡在卫星移动系统中的实现提供了理论依据。

参考文献:

- [1] MOE Ralnama. Channel estimation in a fading channel: US, 6182251B1[P]. 2001-01-30.
- [2] 刘解华, 刘斌彬, 敬军. 用于卫星移动通信终端的信道估计和均衡的方法及装置: 中国, 201310714440.9[P]. 2014-03-19.
- [3] DOUILLARD C. Iterative correction of intersymbol interference: Turbo equalization[J]. Eur. Trans. Telecom, 1995(6): 507-511.
- [4] 许可. Turbo解码与Turbo均衡关键技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2011.
- [5] 李强. 迭代均衡系统中的一种SNR估计方法[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(4): 836-839.
- [6] 万科. MAP译码算法对信道估计偏差敏感度分析[J]. 通信学报, 2006, 27(1): 41-44.
- [7] 杨晓梅. 无线通信信噪比估计算法研究与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2014.

声 明

为适应我国信息化建设的需要、提高本刊的学术影响力、扩大作者知识信息交流渠道,本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社、万方数据库等以数字化方式通过信息网络传播本刊全文。作者向本刊提交文章发表的行为即视为同意我刊上述声明。