

文章编号:1001-893X(2011)08-0061-05

Turbo 编码 GMSK 信号的多普勒频移捕获与跟踪^{*}

吴团锋^{1,2}, 徐友云^{1,2}, 归琳¹, 马文峰²

(1.上海交通大学 无线通信技术研究所,上海 200240;2.解放军理工大学 通信工程学院,南京 210007)

摘要:提出了 Turbo 编码 GMSK 信号的多普勒频移捕获和跟踪方案。该方案首先采用 AR 模型进行多普勒频移的初始捕获,其次采用基于 FFT 的联合帧同步和频偏估计算法捕获剩余频差,最后利用判决反馈 PLL 跟踪多普勒频移的变化。仿真结果表明:该算法在低信噪比时可快速捕获超过符号速率的多普勒频移,并能以很小的误差跟踪多普勒频移的变化,此时解调器误码率性能恶化量较小。

关键词:卫星移动通信;GMSK;Turbo 码;多普勒频移;AR 模型;判决反馈 PLL 环

中图分类号:TN911.3 **文献标识码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1001-893x.2011.08.013

Doppler Frequency Shift Acquisition and Tracking for Turbo Coded GMSK Signals

WU Tuan-feng^{1,2}, XU You-yun^{1,2}, GUI Lin¹, MA Wen-feng²

(1.Institute of Wireless Communications Technology, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;

2.Institute of Communications Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)

Abstract: A new algorithm of Doppler frequency shift acquisition and tracking for Turbo coded GMSK signals is presented. The signal is captured by AR model and FFT based frame synchronization algorithm. The decision-feedback PLL is employed to track Doppler frequency shift. Simulation results show that the algorithm can capture and track the signal with the frequency shift larger than the symbol rate under low E_b/N_0 , while the amount of demodulation bit error rate(BER) performance degradation is small.

Key words: satellite mobile communication; GMSK; Turbo code; Doppler frequency shift; AR model; decision feedback PLL

1 引言

GMSK 信号的包络恒定、相位连续,因此具有很多显著的优点,如射频功放可以工作在饱和区,充分利用发射机功率;对衰落环境不太敏感,邻道干扰较小等,因此在无线和卫星移动通信系统中得以成功应用^[1]。Turbo 码在低信噪比条件下具有非常优异的性能^[2],非常适合作为恶劣信道环境下的信道编

码方案,因此, Turbo 编码和 GMSK 调制相结合的方案是一种比较适合于卫星移动通信系统的传输体制^[3],目前该体制已在某卫星通信系统中成功应用。

在卫星移动通信系统中,多普勒频移是影响通信性能的主要因素之一。多普勒频移是由于地球站(例如机载站、车载站)的移动或者卫星的漂移产生的。Ka 频段具有频谱可用率高、潜在干扰小和设备体积小等优点,将成为未来卫星通信的主流和军事卫星通信发展的必然趋势。然而,由于 Ka 频段频率

^{*} 收稿日期:2011-03-30;修回日期:2011-05-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60625103,60902018);上海市数字媒体处理与传输重点实验室资助项目

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No. 60625103,60902018); The Shanghai Key Laboratory of Digital Media Processing and Transmissions Supported Project

很高,此时的多普勒频移问题将非常严重,有可能远远超过符号速率,这就要求接收机具有捕获和跟踪大多普勒频移的能力。

本文提出了大多普勒频移的捕获和跟踪算法,该算法首先采用 AR 模型进行超过符号速率的多普勒频移的初始捕获,其次采用基于 FFT 的联合帧同步和频偏估计算法捕获剩余频差,最后利用锁相环 PLL 跟踪多普勒频移的变化。仿真结果表明:该算法在低信噪比时可快速捕获超过符号速率的多普勒频移,并能以很小的误差跟踪多普勒频移的变化。调制符号速率为 $R_s = 9.6 \text{ ksymbol/s}$ 时,可快速捕获 $-19.2 \sim +19.2 \text{ kHz}$ 范围内的多普勒频移;当多普勒频移以直线形式变化且多普勒速率为 100 Hz/s 时,跟踪误差小于 6 Hz 。基于该算法的解调器可以很好地在有多普勒频移的条件下工作。

2 系统模型

作为 CPM 信号的典型代表,GMSK 信号与信息序列之间存在非线性关系,根据 Laurent 分解定理^[4],将 GMSK 信号分解为几个时间有限 PAM 信号的线性组合。如果发送端进行预编码,则在接收端采样数据经过解旋转后的表达式为

$$r_k = \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n h_0(kT_s - nT_s) e^{j(2\pi\Delta f n T_s + \phi_0)} + w_k = a_k h_0(0) e^{j(2\pi\Delta f k T_s + \phi_0)} + \sum_{n=-\infty, n \neq k}^{\infty} a_n h_0(kT_s - nT_s) e^{j(2\pi\Delta f n T_s + \phi_0)} + w_k \quad (1)$$

式中, $a_n \in \{1, -1\}$ 为 Turbo 编码输出比特, $h_0(t)$ 为 Laurent 分解后第一个 PAM 信号的冲激响应, T_s 是调制符号的时间宽度, $R_s = 1/T_s$ 是符号速率, Δf 为多普勒频移, ϕ_0 为相差, w_k 是方差 $\sigma_w^2 = N_0/E_b$ 的复高斯白噪声, N_0 为噪声功率, E_b 为每比特能量。另外,式(1)中第 1 项为有用信号,第 2 项为码间串扰,与有用信号相比,码间串扰的值较小。

接收信号的多普勒频移范围大,也就是说信号的不确定性范围大,所以接收机抗混叠滤波器的带宽必须足够大,使得信号不失真通过,此时将引入大量噪声,从而导致接收信号的信噪比相对降低。另外,Turbo 编码 GMSK 信号的信噪比门限较低,因此,低信噪比将成为接收信号的主要特征。

3 多普勒频移捕获与跟踪方案

多普勒频移捕获分为两步进行,首先是采用自

回归(AR)模型进行超过符号速率的多普勒频移的初始捕获;其次,采用基于 FFT 的联合帧同步和频偏估计算法捕获剩余频差。

AR 模型认为信号是由白噪声通过一个全极点滤波器产生的,滤波器的传递函数为

$$H(z) = \frac{1}{1 - \sum_{k=1}^p a_k z^{-k}} \quad (2)$$

式中,AR 模型系数 $\{a_1, a_2, \dots, a_p\}$ 的求解方法可以采用 Yule - Walker 算法、Levinson - Durbin 算法、协方差算法和 Burg 算法,但这些算法都比较复杂。文献[5]表明 AR 谱估计与线性预测谱估计等效,则可以通过求解最佳前向预测系数来求 AR 模型系数。前向预测滤波器和前向预测误差滤波器具有如下关系:

$$a_k = \begin{cases} 1, & k = 0 \\ -w_k, & k = 1, 2, \dots, p \end{cases} \quad (3)$$

式中, w_k 是前向预测误差滤波器的系数,因此我们可以采用自适应滤波算法来求解系数。自适应前向预测误差滤波器结构如图 1 所示。

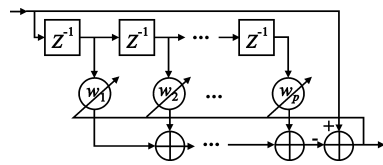


图 1 自适应前向预测误差滤波器
Fig.1 Adaptive forward prediction error filter

因为调制信号样点之间具有相关性,而噪声没有相关性。等效地,用 AR 模型来拟合时,调制信号对应的 AR 模型系数较大,而噪声对应的 AR 模型系数较小,因此可用 AR 模型按照频率步进 Δf_d 为单位进行扫频,计算出每个频率点的判决变量 D ,选取 D 最大值对应的频率点作为大多普勒频移的初始估。

$$D = \sum_{k=1}^p |w_k|^2 \quad (4)$$

为了实现快速的频率捕获,我们采用收敛速度较快的可变步长 LMS 算法(VSLMS)^[6]求解 AR 系数:

$$e(n) = d(n) - \mathbf{W}^H(n) \mathbf{U}(n) \quad (5)$$

$$\mu'(n+1) = \alpha \mu(n) + \gamma e(n) e^*(n) \quad (6)$$

$$\mu(n+1) = \begin{cases} \mu_{\max}, & \mu'(n+1) > \mu_{\max} \\ \mu_{\min}, & \mu'(n+1) < \mu_{\min} \\ \mu'(n+1), & \text{其它} \end{cases} \quad (7)$$

$$\mathbf{W}(n+1) = \mathbf{W}(n) + \mu(n+1) \mathbf{U}(n) e^*(n) \quad (8)$$

式中, $\mathbf{W}(n) = [w(1), w(2), \cdots, w(p)]^T$ 是自适应滤波器在 n 时刻的抽头系数矢量; $d(n)$ 为滤波器输入, $\mathbf{U}(n) = [d(n-1), d(n-2), \cdots, d(n-p)]^T$ 是自适应滤波器在 n 时刻的输入信号矢量; $\mu(n)$ 是第 n 时刻的步长, $\mu(n) \in [\mu_{\min}, \mu_{\max}]$, 因子 $0 < \alpha < 1$, $\gamma > 0$ 。

采用 AR 模型进行大多普勒频移捕获时, 剩余频差的绝对值最大为频率步进 Δf_d , 因此需要别的算法来捕获剩余频差。常用的频偏估计算法有 M&M 算法^[7]、L&R 算法^[8] 和 Fitz 算法^[9], 但这些算法都是针对单频信号进行估计的, 因此, 要采用这些算法进行剩余频差捕获, 就要消除调制信息(即去调制), 将 GMSK 调制信号转化为单频信号。根据对发送序列的了解与否, 去调制的方法分为数据辅助(Data - Aided) 和非数据辅助(Nondata - Aided) 两类。非数据辅助方法会使噪声功率变大, 从而降低了信号信噪比。而 GMSK 信号采用准相干算法解调时, 具有无需恢复载波相位和位同步简单的特点^[10], 但是需要利用数据流中周期插入的独特码 UW 进行信道估计。可利用 UW 去调制, 则需先进行帧同步, 而在存在频偏条件下进行帧同步是比较困难的。此时, 需要同时确定 UW 起始位置 k 和剩余频差 Δf , 使得式(9)的值最大:

$$\Lambda(k, \Delta f, \phi_0) = \left| \sum_{l=0}^{M-1} r_{l+k} e^{-j\phi_l} e^{-j2\pi\Delta f T_s l} \right| \quad (9)$$

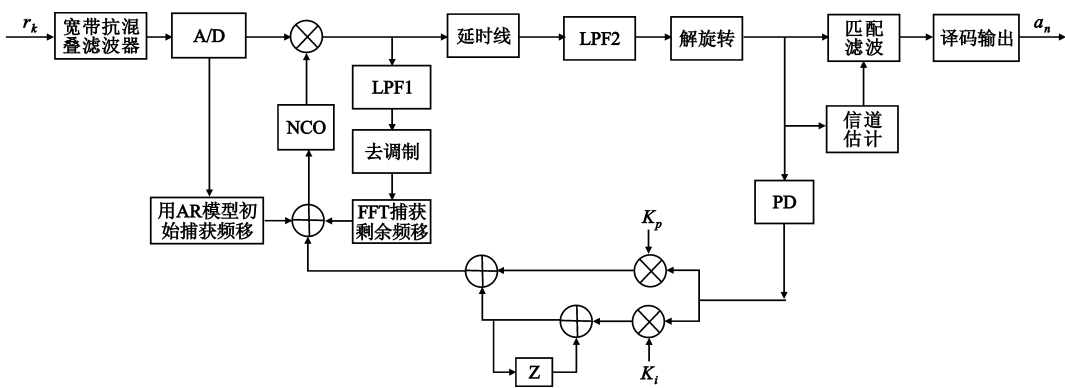


图 2 大多普勒频移条件下解调器结构
Fig.2 Demodulator structure under the condition of large Doppler frequency shift

4 仿真结果与分析

Turbo 码采用 PCCC 编码方案, 分量码编码器 RSC1 和 RSC2 为(7,5)递归系统卷积码, 码率 $R =$

文献[11]中基于 FFT 的联合帧同步检测和频偏估计算法可以有效地解决这个问题, 在进行帧同步的同时完成剩余频差捕获。

理想二阶环可以跟踪频率斜升信号, 具有固定的相位差^[12], 当采用准相干解调方案时, 信道估计包含了该相位差, 因此可以采用二阶 PLL 来跟踪多普勒频移的变化。由 Laurent 分解定理可知, GMSK 经解旋转操作后可看作是双极性 PAM 信号, 因此可采用判决反馈 PLL 环, 则鉴相误差的表达式为

$$e = Q \operatorname{sgn}(I) \quad (10)$$

式中, I, Q 分别表示输入鉴相器 PD 的信号的实、虚部, $\operatorname{sgn}(x) = \begin{cases} +1, & x > 0 \\ -1, & x < 0 \end{cases}$ 。鉴相误差经环路滤波后, 控制 NCO 的输出来跟踪多普勒频移的变换。二阶环路滤波器传输函数为

$$F(z) = K_p + K_i \frac{z^{-1}}{1 + z^{-1}} \quad (11)$$

改变 K_p, K_i 的值, 即得到不同的环路带宽。

大多普勒频移条件下解调器结构如图 2 所示, 多普勒频移的捕获和跟踪过程可简要描述为: 首先采用 AR 模型完成多普勒频移的初始捕获, 并设置数控振荡器 NCO 的初始值进行校频; 其次采用 FFT 在进行帧同步的同时完成剩余频差捕获, 并更新 NCO 的值; 在多普勒频移跟踪过程中, 解调器根据环路滤波器输出更新 NCO 的值。

1/2, 交织器采用 S - 随机 - 模 k 对称交织器 ($S = 15$), 长度为 $N = 1\,024$; GMSK 信号 $BT = 0.3$; Turbo 码译码器迭代次数为 5 次。

在 AWGN 信道下对解调器的性能进行了仿真,

参数如下:调制符号速率为 $R_s = 9.6$ ksymbol/s,最大归一化多普勒频移范围为 $\Delta f T_s \in [-2, +2]$,多普勒频移以直线形式变化,多普勒速率为100 Hz/s。AR模型扫频时频率步进 $\Delta f_d = 0.2 R_s$ 。VSLMS 算法步长初值 $\mu(0) = 2^{-4}$, $\mu_{\min} = 2^{-15}$, $\mu_{\max} = 2^{-3}$, $\alpha = 0.98$, $\gamma = 2^{-12}$ 。自适应滤波器阶数 $p = 4$ 。独特码符号长度 $M = 64$,FFT 变换长度 $N = 256$ 。PLL 环路滤波器参数 K_p 和 K_i 分别为0.025 6和0.000 163 84。低通滤波器 LPF1 和 LPF2 的带宽分别为 $0.7 R_s$ 和 $0.5 R_s$ 。

多普勒频移捕获算法的归一化平方根均方误差(NRMSE)定义为

$$\delta_e = \sqrt{E[(\Delta f - \Delta f')^2]} T_s \tag{12}$$

式中, Δf 是多普勒频移真实值, $\Delta f'$ 是多普勒频移估计值。图3~5仿真结果表明:该算法在低信噪比时可快速捕获超过符号速率的多普勒频移,并能以很小的误差跟踪多普勒频移的变化。

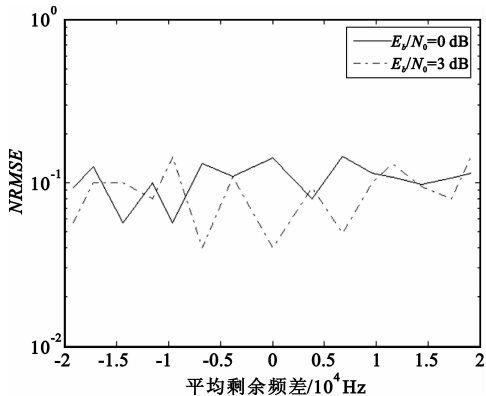


图3 AR模型多普勒频移初始捕获性能
Fig.3 The initial Doppler shift acquisition performance of AR model

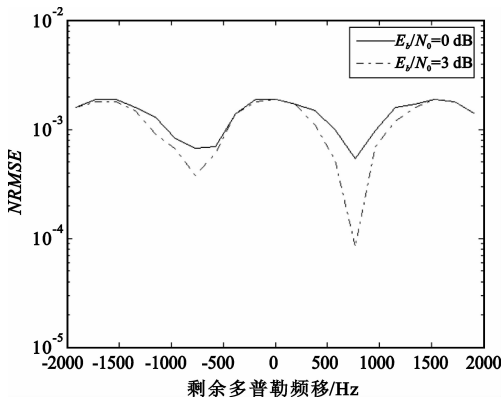


图4 FFT 剩余频差捕获性能

Fig.4 The residual frequency offset acquisition performance of FFT

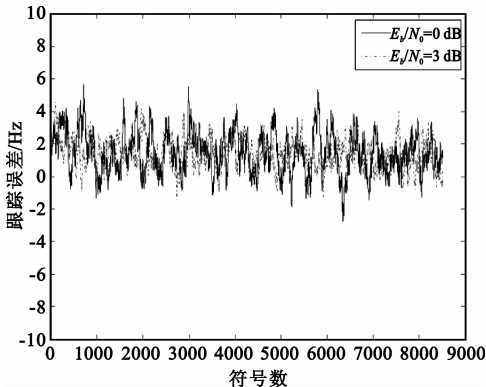


图5 PLL跟踪频率误差
Fig.5 The frequency tracking error of PLL

图6给出了具有多普勒频移捕获和跟踪功能的解调器 BER 曲线,Ideal 曲线表示理想值,Doppler 曲线则表示有多普勒频移时的误码率。迭代信道估计时采用 LLR(c)硬判决迭代,迭代信道估计次数为2次^[13]。仿真结果表明,给出的具有多普勒频移捕获和跟踪功能的解调器可以很好地在有多普勒频移的条件下工作,与 BER 理论值曲线相比,还存在一定的性能恶化,但该恶化量较小。

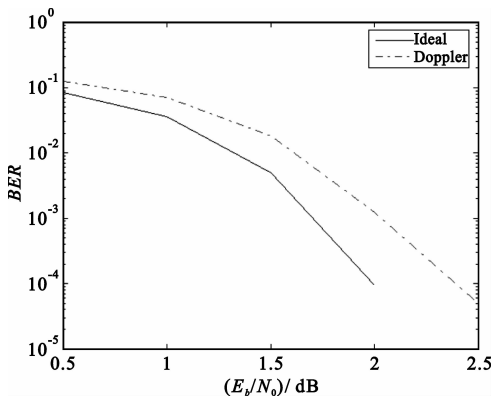


图6 Turbo 编码 GMSK 信号解调器 BER
Fig.6 The demodulation BER of Turbo coded GMSK signal

5 结束语

本文提出了 Turbo 编码 GMSK 信号的多普勒频移捕获和跟踪方案。仿真结果表明:该算法在低信噪比时可快速捕获超过符号速率的多普勒频移,并能以很小的误差跟踪多普勒频移的变化。将 Turbo 译码器输出反馈至 PLL 提高跟踪精度和减小解调器误码率性能恶化量是下一步的研究目标。

参考文献:

- [1] Graell i AA, Abdel N C, Douillard C. Serially concatenated continuous phase modulation for satellite communications[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(6): 3260 – 3269.
- [2] Berrou C, Glavieux A. Near optimum error correcting coding and decoding: Turbo – codes [J]. IEEE Transactions on Communications, 1996, 44(10): 1261 – 1271.
- [3] 吴团锋, 杨喜根. Ka 频段卫星移动通信中信号传输体制设计与仿真[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(7): 1987 – 1990.
WU Tuan – feng, YANG Xi – gen. Design and simulation of signal transmission scheme over Ka – band mobile satellite channel[J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(7): 1987 – 1990. (in Chinese)
- [4] Laurent P A. Exact and approximate construction of digital phase modulation by superposition of amplitude modulated pulse (AMP) [J]. IEEE Transactions on Communications, 1986, 34(2): 150 – 160.
- [5] Haykin S. Adaptive filter theory [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1998.
- [6] Raymond H K, Edward W J. A variable step size LMS algorithm[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1992, 40(7): 1633 – 1642.
- [7] Mengali U, Morelli M. Data – aided frequency estimation for burst digital transmission[J]. IEEE Transactions on Communications, 1997, 45(1): 23 – 25.
- [8] Luise M, Reggiani R. Carrier Frequency recovery in all – digital modems for burst – mode transmission[J]. IEEE Transactions on Communications, 1995, 43(2/3/4): 1169 – 1178.
- [9] Fitz M P. Further result in the fast estimation of a single frequency[J]. IEEE Transactions on Communications, 1994, 43(2/3/4): 862 – 864.
- [10] Baier A, Heinrich G, Wellens U. Bit synchronization and timing sensitivity in adaptive Viterbi equalizers for narrow-band TDMA digital systems[C]//Proceedings of 1988 IEEE Vehicular Technology Conference. Philadelphia, PA, USA: IEEE, 1988: 377 – 394.
- [11] 吴团锋, 杨喜根, 李际平. 一种基于 FFT 的联合帧同步和频偏估计算法[J]. 电子与信息学报, 2006, 28(5): 840 – 843.
WU Tuan – feng, YANG Xi – gen, LI Ji – ping. Combined Algorithm Based on FFT for Frame Synchronization and Frequency Offset Estimation[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2006, 28(5): 840 – 843. (in Chinese)
- [12] 张厥盛, 郑继禹, 万心平. 锁相技术[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2001.
ZHANG Jue – sheng, ZHENG Ji – yu, WAN Xin – ping. Phase locked loop [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2001. (in Chinese)
- [13] 吴团锋, 杨喜根. Turbo 编码 GMSK 信号准相干解调时的迭代信道估计和译码研究[J]. 通信学报, 2006, 27(7): 106 – 111.
WU Tuan – feng, YANG Xi – gen. The iterative channel estimation and decoding algorithm for quasi – coherent detection of Turbo coded GMSK signals[J]. Journal on Communications, 2006, 27(7): 106 – 111. (in Chinese)

作者简介:

吴团锋(1977—), 男, 陕西乾县人, 讲师, 研究方向为卫星通信与移动通信;

WU Tuanfeng was born in Qianxian, Shaanxi Province, in 1977. He is now a lecturer. His research interests include satellite communications and mobile communications.

Email: wtf_chenxiao@163.com

徐友云(1966—), 男, 浙江兰溪人, 教授、博士生导师, 主要研究方向为移动通信与个人通信;

XU You – yun was born in Lanxi, Zhejiang Province, in 1966. He is now a professor and also the Ph.D. supervisor. His research interests include mobile communications and personal communications.

Email: yyxu@vip.sina.com

归琳(1975—), 女, 江苏常熟人, 副教授, 主要研究方向为宽带无线视频通信;

GUI Lin was born in Changshu, Jiangsu Province, in 1975. She is now an associate professor. Her research concerns broadband video communication in wireless network.

Email: guilin@sjtu.edu.cn

马文峰(1974—), 男, 新疆乌鲁木齐人, 副教授, 主要研究方向为移动通信。

MA Wen – feng was born in Urumqi, Xinjiang Uygur Autonomous Region, in 1974. He is now an associate professor. His research concerns mobile communications.