

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2015.03.008

引用格式:闫涛,张大鹏,陶祁.采用延时积分的MSK软判决解调方法[J].电讯技术,2015,55(3):275-278. [YAN Tao,ZHANG Dapeng,TAO Qi. A Novel Soft-decision Demodulation Method with Time-delay Integration for MSK Signals[J].Telecommunication Engineering,2015,55(3):275-278.]

采用延时积分的MSK软判决解调方法*

闫涛^{1,**},张大鹏²,陶祁¹

(1.空军第一航空学院 航空电子工程系,河南 信阳 464000;2.解放军95883部队,北京 102206)

摘要:针对最小频移键控(MSK)信号的软信息计算,提出了一种采用延时积分的软判决解调方法。该方法建立在MSK延时判决解调方案的基础上,按照条件概率理论的推导结果,使用接收已调信号同相分量和正交分量积分度量的乘积来表征原二进制信息码元的对数似然比信息,并以此作为MSK信号的软判决输出。分析与仿真结果表明,该方法简单方便,具有较大的通用性和灵活性,在Turbo联合MSK的编码调制系统中应用可以获得较为优异的抗噪声性能。

关键词:编码调制系统;最小频移键控;延时判决解调;对数似然比;软信息;抗噪性能

中图分类号:TN919.7 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2015)03-0275-04

A Novel Soft-decision Demodulation Method with Time-delay Integration for MSK Signals

YAN Tao¹,ZHANG Dapeng²,TAO Qi¹

(1. Aeronautic Electronic Engineering Department, The First Aeronautical Institute of Air Force, Xinyang 464000, China; 2. Unit 95883 of PLA, Beijing 102206, China)

Abstract: A novel soft-decision demodulation method is proposed for the soft information computation of minimum shift keying (MSK). The new method can be considered as the improved time-delay-decision demodulation scheme. With this method, the log-likelihood ratio of each information bit is computed by the product of in-phase and quadrature component of MSK signal according to deduction from the theory of conditional probability and the log-likelihood ratio is taken as soft output of MSK. Analysis and simulation results indicate that the proposed novel method can achieve better noise suppression performance in Turbo coded MSK system, and it is applicable to other coded modulation systems because of its easy implementation.

Key words: coded modulation system; minimum shift keying; time-delay-decision demodulation; log-likelihood ratio; soft information; noise suppression performance

1 引言

作为一种较为先进的数字通信信号调制方式,最小频移键控(Minimum Shift Keying, MSK)具有包络恒定、相位连续、频带利用率高、带外辐射功率小等优点^[1],在现代通信系统特别是军事通信中得到了广泛的应用。

和其他数字调制方式相同,在实际的应用中,MSK调制往往和信道编码技术相结合以获得较好的系统抗噪声和抗干扰性能。传统的分组编码和卷

积码在译码过程中需要解调输出的硬判决信息,MSK按照常规的硬判决解调方法即可满足要求。然而,随着Turbo码的提出,迭代译码的思想在信道编译码技术领域内得到了广泛运用,软判决解调以其信息量损失小、对系统性能提升较大获得一致认可,因此,MSK信号的软判决解调成为其应用于软输入软输出(Soft Input Soft Output, SISO)迭代译码系统中需要解决的核心问题。

MSK是一种连续相位调制(Continuous Phase

* 收稿日期:2014-09-19;修回日期:2014-12-26 Received date:2014-09-19;Revised date:2014-12-26

** 通讯作者:sarprayer@126.com Corresponding author:sarprayer@126.com

Modulation, CPM), 其调制过程可分解为连续相位编码器(Continuous Phase Encoder, CPE)与无记忆调制器(Memoryless Modulator, MM)的级联, 可以看作是码率为 1 的卷积码和无记忆调制器的组合^[2], 因此, MSK 的调制过程可以使用网格图来描述, 其最优的软判决解调方法一般采用最大似然序列估计(Maximum Likelihood Sequence Estimation, MLSE)检测 Viterbi 算法^[3]和逐符号最优的最大后验概率(Maximum a Posteriori Probability, MAP)检测算法^[4], 借助反馈迭代译码构成软输入软输出的迭代检测系统。这两种方法虽然可以获得比较优异的性能, 但是算法复杂度较高、延时较大, 同时, 由于编码调制的一体化设计, 上述两种 MSK 软判决解调算法的通用性和灵活性较差。

文献[5]根据 MSK 信号的特点提出了符号提取与幅度加权相结合的 MSK 软差分解调算法, 适用于 MSK 调制与各种软判决译码串行级联, 具有较强的通用性, 但是文献中并未给出相关的理论依据, 并且其实现方法相对复杂。

本文在深入研究 MSK 延迟判决解调方案的基础上, 根据条件概率的相关理论, 结合对数似然比信息的定义提出了一种基于延迟积分的 MSK 信号软判决解调方法。仿真与分析结果表明, 与文献[5]给出的幅度加权差分解调算法相比, 该方法简单方便, 在 Turbo+MSK 编码调制系统中应用能够获得更加优异的抗噪声性能。

2 MSK 调制原理及其延时判决解调

MSK 信号在第 k 个码元内的波形可表示为^[6]

$$s(t) = \sqrt{\frac{2E_b}{T_s}} \cos \left[\omega_c t + \frac{a_k \pi}{2T_s} t + \varphi_k \right], (k-1)T_s \leq t \leq kT_s. \quad (1)$$

式中, $\omega_c = 2\pi f_c$ 为载波角频率; $a_k = \pm 1$ (当输入码元为“1”时, $a_k = +1$; 当输入码元为“0”时, $a_k = -1$); E_b 为码元能量; T_s 为 MSK 信号的码元宽度, 为分析方便, 这里将信号幅度进行归一化处理, 即 $\sqrt{2E_b/T_s} = 1$; φ_k 为第 k 个码元的初始相位, $\varphi_k = 0$ 或 π , 它在一个码元宽度中是不变的, 它不仅与当前的输入 a_k 有关, 还与前一码元的相位 φ_{k-1} 和 a_{k-1} 相关。

MSK 信号可以使用同相和正交两个分量表示:

$$s(t) = p_k \cos \frac{\pi t}{2T_s} \cos \omega_c t - q_k \sin \frac{\pi t}{2T_s} \sin \omega_c t. \quad (2)$$

式中, 右端第 1 项称作同相分量, 其载波为 $\cos \omega_c t$; 第 2 项称作正交分量, 其载波为 $\sin \omega_c t$; p_k 和 q_k 为包

含输入码元信息的 ± 1 序列, 不妨将其称之为同相码元和正交码元, 其中 $p_k = \cos \varphi_k$, $q_k = a_k \cos \varphi_k = a_k p_k$ 。根据这一特性, MSK 调制信号可以通过对输入码元信息进行差分编码的方式产生, 如图 1 所示。

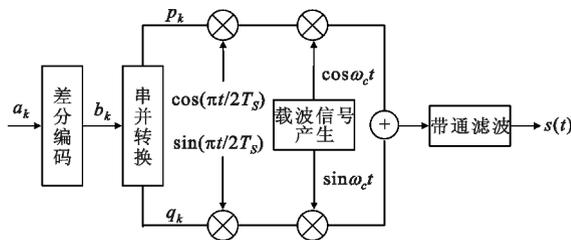


图 1 基于差分编码的 MSK 调制信号产生方框图
Fig. 1 Block diagram of the MSK transmitter with differential encoding

由图 1 可以看出, 输入码元序列 $\{a_k\}$ 经过差分编码即可获得同相码元和正交码元, 经载波调制后即可获得 MSK 信号。

由于 MSK 本质上是一种码元波形严格正交的 2FSK 调制, 因此在接收端可以沿用 2FSK 的相干解调和非相干解调完成调制信号的恢复。除此之外, 根据 MSK 信号附加相位连续变化的特性, 接收端也可以采用延时判决相干解调, 其结构如图 2 所示。

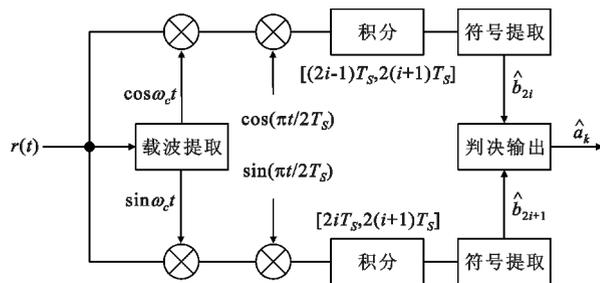


图 2 MSK 信号的延迟判决解调方框图
Fig. 2 Block diagram of the MSK receiver with time-delay-decision demodulation scheme

首先, 从受噪声污染的 MSK 信号 $r(t)$ 提取载波, 然后将其与 $r(t)$ 分别按照“同相”和“正交”两路进行相关运算, 完成相干解调, 并将运算结果进行低通滤波后在两个码元周期即 $2T_s$ 内完成积分, 最后提取符号并根据符号的异同判决输出原调制码元信息, 判决输出的过程实际上是解差分过程。

3 采用延时积分的 MSK 软判决解调方法

MSK 的延时判决解调利用了前后两个码元的信息对前一码元作判决, 因此可以提高数据的可靠性。但是, 延迟判决解调输出的是码元的硬判决信息, 其结果不能直接用于软输入软输出的迭代译码系统。为了获得 MSK 信号的软解调信息, 需要对

MSK 信号的延时判决解调方案进行改进。

在延迟判决解调方案中, 解调器将接收到的信号 $r(t)$ 分成两路处理, 分别从中恢复出原调制信号中的同相码元和正交码元的硬判决信息, 最后按照这两路信息完成解差分过程。要获得软判决信息, 可以对同相和正交两路信号不作判决, 直接使用积分结果作为解调的软输出, 但如何通过这两路软输出信号进行“软差分”最终获得 MSK 信号的软判决解调信息是一个值得研究的问题, 也是实现 MSK 信号软输出的关键。本文试图从具有差分关系的调制码元着手进行分析。

由于差分编解码只是两个相邻码元存在关联, 为了简化分析, 考虑两个相邻时刻的信号调制和解调情况, 这里仅在理想抽样条件下进行分析。假设 x_{k-1} 为 MSK 调制器 $k-1$ 时刻的抽样输出, 由于差分的关系以此作为参考信号, k 时刻调制器输出可表示为 $x_k = \psi_k x_{k-1}$, 其中 $\psi_k = \pm 1$, 不妨定义为差分编码系数, 其取值取决于 k 时刻和 $k-1$ 时刻输入码元的关系。在 AWGN 信道中, 经过噪声污染后对应接收端的信号可以表示为

$$y_{k-1} = \sqrt{\rho} x_{k-1} + \omega_{k-1}, \quad (3)$$

$$y_k = \sqrt{\rho} x_k + \omega_k. \quad (4)$$

式中, ρ 为信噪比, ω_k, ω_{k-1} 均为服从 $N(0, 1)$ 分布的高斯离散白噪声。若对于式(3)两端同乘以 ψ_k , 则有

$$\psi_k y_{k-1} = \sqrt{\rho} \psi_k x_{k-1} + \psi_k \omega_{k-1}. \quad (5)$$

将 $x_k = \psi_k x_{k-1}$ 代入式(4), 得

$$y_k = \sqrt{\rho} \psi_k x_{k-1} + \omega_k. \quad (6)$$

综合式(5)和式(6)可得

$$y_k = \psi_k y_{k-1} + \omega_k - \psi_k \omega_{k-1} = \psi_k y_{k-1} + \omega'_k. \quad (7)$$

显然, 式中 $\omega'_k = \omega_k - \psi_k \omega_{k-1}$, 服从 $N(0, 2)$ 分布, 其均方差 $\sigma_n^2 = 2$ 。在 Turbo 译码过程中, 输入 SISO 译码器的是关于信息比特的对数似然比信息, 我们不妨考察 y_k 关于差分编码系数 ψ_k 和前时刻接收信息 y_{k-1} 的条件概率密度函数(PDF)

$$p(y_k / \psi_k, y_{k-1}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_n}} e^{-\frac{(y_k - \psi_k y_{k-1})^2}{2\sigma_n^2}}. \quad (8)$$

根据对数似然比的定义, 不难计算并化简得到对数似然比

$$\lambda = \ln \frac{p(y_k / y_{k-1}, \psi_k = -1)}{p(y_k / y_{k-1}, \psi_k = +1)} = -y_{k-1} y_k. \quad (9)$$

由上述分析可知, 该对数似然比表征了 k 时刻输入 MSK 调制器信息码元的软判决度量, 可以看出, MSK 信号软信息等于当前码元软判决信息 y_k 与前一码元软判决信息 y_{k-1} 乘积的相反数。根据这一关系, 本文在 MSK 延迟解调方框图的基础上给出

MSK 信号软信息获取方法, 如图 3 所示。

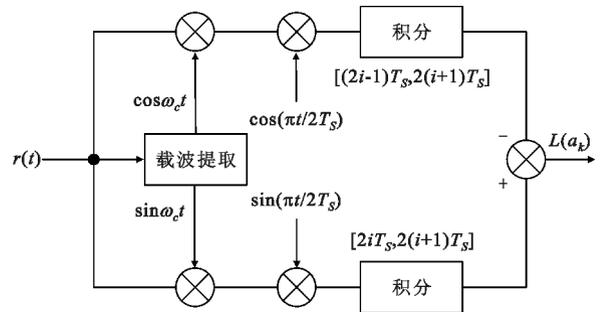


图 3 MSK 信号软判决解调框图结构
Fig. 3 Block diagram of soft-decision demodulation for MSK signal

受噪声污染的 MSK 信号经过如图 3 中的载波提取、相关运算、延迟积分等过程分别获得同相和正交分量的软判决度量。由于在此过程中只进行了线性运算, 因此积分器输出同相分量和正交分量的软判决度量可认为是调制器输出的码元信息与高斯白噪声的叠加, 即在解调过程中, 我们可以将图 3 中接收端同相和正交两条支路的积分器输出信号等效为式(3)和式(4)中的 y_{k-1} 和 y_k , 这样, 按照式(9)计算的对数似然比信息可以表征调制 MSK 信号的二进制信息码元的最大后验概率之比。

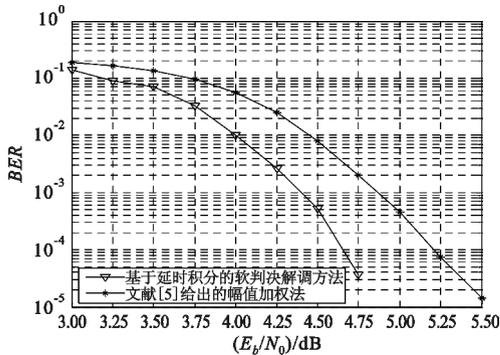
4 性能仿真与分析

为验证采用延时积分 MSK 软判决解调方法的有效性和可靠性, 将其与 Turbo 码系统级联构成 Turbo 联合 MSK 编码调制系统, 采用 Le. Goff 提出的 BITCM 系统构造方案^[6], 将 MSK 软信息也即二进制信息比特的对数似然比信息直接输入标准的二元 Turbo 译码器进行迭代译码。

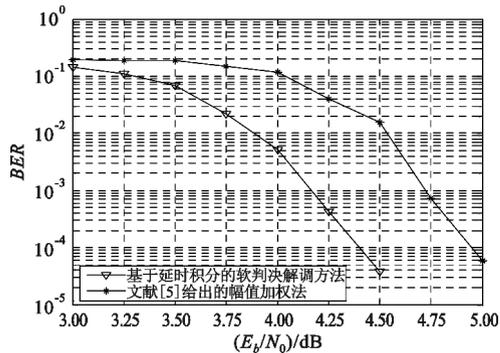
为方便对比, 与文献[5]相同, 按照第三代移动通信标准(3GPP)的相关参数进行设置, 选取(13, 15) RSC 码作为 Turbo 码的分量编码器, 使用 3GPP 伪随机交织器, 两个成员译码器的译码算法采用 Max-Log-MAP 算法, 设置迭代译码次数为 6 次, 信息帧长分别选取 512 bit 和 1024 bit, 系统的误码率(Bit Error Rate, BER)曲线分别如图 4(a) 和(b)所示, 图中幅值加权法的系统误码率数据来自于文献[5]给出的系统性能曲线。

由图 4 可以看出, 采用延时积分的软判决解调方法能够为 Turbo 联合 MSK 的编码调制系统带来更加优异的 BER 性能, 相对于文献[5]给出的性能最优的幅值加权法, 其对系统性能的提升至少 0.5 dB。分析原因在于, 本文提出的软判决解调方法获取的是二进制信息比特的对数似然比信息, 其

理论依据源自于最大后验概率译码算法,可靠性和信用度相对较高;而文献[5]给出的 MSK 软解调信息仅仅停留在不作判决的信号幅度这一层面上,虽然形式上是软判决结果,但其信息有用性相对较弱。



(a) 512 bit



(b) 1024 bit

图4 基于延时积分软判决解调和幅值加权法的 Turbo 联合 MSK 编码调制系统 BER 性能比较

Fig. 4 BER comparison between Turbo coded MSK systems respectively using time-delay soft decision demodulation method and amplitude weighting scheme in the receiver

与幅值加权法相同,基于延时积分软判决解调方法不需要通过迭代检测获得信息码元的软信息,虽然在一定程度上损失了性能,但是由于接收端解调和译码具有一定的独立性,在应用时更加灵活,适用于同时嵌入多种编码和调制方式的软件无线电系统。另外,从实现复杂度来看,基于延时积分软判决解调只需将同相分量和正交分量的积分度量相乘即可,相比幅值加权法的符号提取、差分译码、取绝对值等处理步骤大大简化。

5 结束语

由于调制过程中差分编码的引入使得 MSK 信号的软判决信息不易获取。本文针对 MSK 的软判决解调提出一种简单有效的计算方法,该方法可看作是 MSK 延迟判决解调方案的改进,具体实现过程是:对延迟判决解调方案中接收 MSK 信号的同相分

量和正交分量不作判决,将其延迟积分度量等效为解调器输出码元与离散高斯白噪声的叠加,根据条件概率的相关理论推导,MSK 信号的软判决信息最终可以表示为同相分量和正交分量的乘积。仿真与分析结果表明,该软判决解调方法简单有效,在 MSK 联合 Turbo 编码调制系统中验证具有较好的抗噪声性能,在相同的仿真条件下,相比已提出的同类软解调算法至少有 0.5 dB 的增益。进一步验证该软判决解调方法是否同样适用于 MSK 与其他软输入软输出迭代译码构成的编码调制系统,是下一步需要研究的问题。

参考文献:

- [1] Pasupathy S. Minimum shift keying: a specially efficient modulation [J]. IEEE Communications Magazine, 1979, 17(7): 14-22.
- [2] Victor F S, Subbarayan P. Iterative decoding of serially concatenated convolutional codes and MSK [J]. IEEE Communications Letters, 1999, 3(9): 272-274.
- [3] Par M, Tor M A. Serially concatenated continuous phase modulation with iterative decoding [J]. IEEE Transactions on Communication, 2001, 49(11): 1901-1915.
- [4] Michael J G, John H L. Symbol-by-symbol MAP demodulation of CPM and PSK signals on Rayleigh flat-fading channels [J]. IEEE Transactions on Communications, 1997, 45(7): 788-799.
- [5] 赵旦峰,朱铁林,薛睿. 迭代译码系统中差分 MSK 软解调算法 [J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(27): 129-131. ZHAO Danfeng, ZHU Tielin, XUE Rui. Soft demodulation algorithm of differential MSK iterative system [J]. Computer Engineering and Applications, 2011, 47(27): 129-131. (in Chinese)
- [6] Goff S L, Glavieux A, Berrou C. Turbo-codes and high spectral efficiency modulation [C] // Proceeding of 1994 IEEE International Conference on Communications. New Orleans, USA: IEEE, 1994: 645-649.

作者简介:



闫涛(1979—),男,河南民权人,2008 年获博士学位,现为讲师,主要研究方向为联合信道编码调制和数据链技术;

YAN Tao was born in Minquan, Henan Province, in 1979. He received the Ph. D. degree in 2008. He is now a lecturer. His research interests include joint coding channel modulation and data link technology.

Email: sarprayer@126.com

张大鹏(1980—),男,山东章丘人,2009 年获博士学位,现为讲师,主要研究方向为协作通信技术;

ZHANG Dapeng was born in Zhangqiu, Shandong Province, in 1980. He received the Ph. D. degree in 2009. He is now a lecturer. His research direction is cooperative communication.

陶祁(1982—),男,湖南株洲人,2007 年获硕士学位,现为讲师,主要研究方向为机载 CNI 系统。

TAO Qi was born in Zhuzhou, Hunan Province, in 1982. He received the M. S. degree in 2007. He is now a lecturer. His research direction is onboard CNI system.