

# GMSK 调制及其 Viterbi 解调的实现

郭艳伟, 李绍胜

(北京邮电大学信息与通信工程学院, 北京 100876)

**摘要:** GMSK 调制是 MSK 调制的延伸, 具有恒定的包络、优秀的频谱利用率和功率利用率。本文研究了 GMSK 的调制原理及其基于 Viterbi 算法的解调, 设计了一种性能优越的调制解调实现方案。方案在 Matlab 上进行性能仿真, 并在 FPGA 上完成了硬件实现和板级验证。结果表明, 本方案产生的调制信号具有良好的频谱及误码性能。

**关键词:** 最小频移键控 (GMSK), 差分相位检测, 维特比算法, FPGA

**中图分类号:** TN92

## The implementation of GMSK modulation and Viterbi demodulation

GUO Yanwei, LI Shaosheng

(School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing, 100876)

**Abstract:** GMSK modulation is an extension of the MSK modulation with constant envelope, better spectrum efficiency and power efficiency. This paper studies the GMSK modulation principle and its demodulation based on Viterbi algorithm, and design a modem scheme with superior performance. Performance simulation in Matlab, and completed the hardware implementation on FPGA and board level validation. Results show that the scheme has good frequency spectrum of modulated signals and error performance.

**Key words:** Gaussian Minimum Shift Keying (GMSK); differential phase detection; Viterbi algorithm; FPGA

## 0 引言

高斯滤波最小频移键控 (GMSK) 是数字通信中一种相位连续的调制方式, 可以看成在 MSK 的基础上进行高斯预滤波。GMSK 信号具有恒定的包络、功率谱特性好、支持非相干解调。这些特性使 GMSK 在存在邻道干扰、非线性功率放大器的系统中具有良好的性能, 是高速数据通信中常用的调制方式, 在移动通信和航天测控等领域也得到了广泛的应用。而数字化调制解调对软件无线电来说是必不可少和至关重要的, 它可以大大降低对模拟器件的使用, 对设备的维护费用也大大降低。<sup>[1]</sup>

为了顺应现代通信的发展需要, 提高数据传输速率, 又考虑到抗干扰的需求, 本文对 GMSK 信号的调制解调技术进行了研究。文中对比了几种不同的 GMSK 调制方式和解调方式, 对一些关键技术——正交调制法, 维特比算法, 差分相位检测进行了研究, 设计了一种性能优越的调制解调实现方案。最后在 FPGA 平台上完成了 GMSK 调制解调的全数字化实现, 给出了具体的模块实现和结论验证。

作者简介: 郭艳伟 (1989 年), 男, 硕士, 研究方向: 软件无线电

通信联系人: 李绍胜, 男, 副教授, 主要研究方向: 多媒体信息处理. E-mail: lss@bupt.edu.cn

## 1 GMSK 调制原理

40 GMSK 是针对 MSK 不能满足某些通信系统的要求, 在调制之前对矩形的数字基带脉冲信号进行高斯低通滤波, 得到了一种新型的基带波形, 使其本身和尽可能高阶的导数都连续, 在进行 MSK 调制, 从而获得更窄的信号带宽和更快的旁瓣衰减速度, 有效抑制了带外干扰。下图是 GMSK 的基本原理图。<sup>[2]</sup>

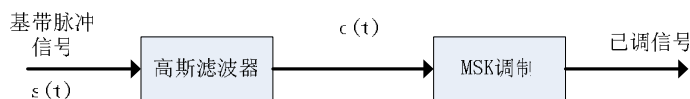


图 1 GMSK 信号产生原理图

45 高斯滤波器的传输函数和冲激响应分别为:

$$H(f) = e^{-\alpha^2 f^2} \quad (1)$$

$$h(t) = \frac{\sqrt{\pi}}{\alpha} e^{-\pi^2 t^2 / \alpha^2} \quad (2)$$

式中, 参数  $\alpha$  与  $H(f)$  的 3dB 基带带宽  $B$  有关, 即  $\alpha = \frac{\sqrt{\ln 2}}{\sqrt{2}B} = \frac{0.5887}{B}$ 。

为了方便 GMSK 的解调, 需要对输入数据进行差分预编码。设输入数据  $d_i \in \{0, 1\}$ , 将  
50 差分编码之后的双极性不归零数据  $a_i$  通过高斯低通滤波器, 则高斯滤波器的输出为

$$X(t) = \sum_i a_i g(t - iT_b) \quad (3)$$

式中  $T_b$  为码元周期,  $g(t)$  为高斯滤波器的矩形脉冲响应。

把  $X(t)$  加于 VCO (压控振荡器), 经调频后的 GMSK 信号为

$$S_{GMSK}(t) = \cos[\omega_c t + \phi(t)] = \cos \phi(t) \cos \omega_c t - \sin \phi(t) \sin \omega_c t \quad (4)$$

55 式中, 相位路径

$$\phi(t) = \frac{\pi}{2T_b} \int_{-\infty}^t [\sum_i a_i g(\tau - iT_b - \frac{T_b}{2})] d\tau \quad (5)$$

可见, GMSK 实现时可采用正交相位调制。由于  $g(t)$  的取值范围为  $(-\infty, +\infty)$ , 它是物理不可实现的, 因此在工程中均需要对  $g(t)$  进行截短或近似。

可以证明  $\int_{-\infty}^{\infty} g(t) dt = T_b$ , 则对  $g(t)$  进行截短处理, 截短长度为  $(2N+1)T_b$ , 即

$$60 \quad g_{\Gamma}(t) = \begin{cases} g(t), & |t| \leq \frac{2N+1}{2} T_b \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (6)$$

经计算, 对于  $BT_b = 0.3$ , 当  $N=2$  时, 有  $\int_{-\infty}^{\infty} g(t) dt = T_b$ 。因而, 在具体计算  $\phi(t)$  时, 取  $g(t)$  的截短长度为  $5T_b$ , 具有足够的精度。

## 2 GMSK 调制的 FPGA 实现

在工程实现中, 最简单的方法使用基带高斯脉冲序列直接调制 VCO 的频率, 如图 1 所示。  
65 这种实现方式的结构较简单, 但是 VCO 频率的稳定性较差, 难以保证 GMSK 信号的性能。另一种实现方法是采用锁相环的 PLL 型调制器, 锁相技术的采用解决了频率稳定性的

问题, 但为了平滑 BPSK 移相器的相位突变, 使得码元转换点的相位连续且没有尖角, 锁相环的传递函数应具有良好的平滑性能和快速响应能力, 这增加了实现复杂程度, 因而实际应用有一定局限。

实际应用最多的是波形存储正交调制法, 如图 2 所示。由上一章的公式可知, 在计算相位路径  $\phi(t)$  后, 即可算出 GMSK 信号。在某一时刻  $t$ ,  $\phi(t)$  只与输入的数据和  $g(t)$  有关, 而  $g(t)$  只取决于其截短长度, 因此  $\phi(t)$  的状态是有限的, 形成的  $\cos \phi(t)$  和  $\sin \phi(t)$  也只有有限个波形。波形存储正交调制法的基本思想就是将  $\cos \phi(t)$  和  $\sin \phi(t)$  离散化, 制成表, 储存在 ROM 中, 根据输入的二进制数据查找波形存储表获得基带 I/Q 信号, 再经过载波调制, I/Q 合成即可形成 GMSK 已调信号<sup>[2-4]</sup>。

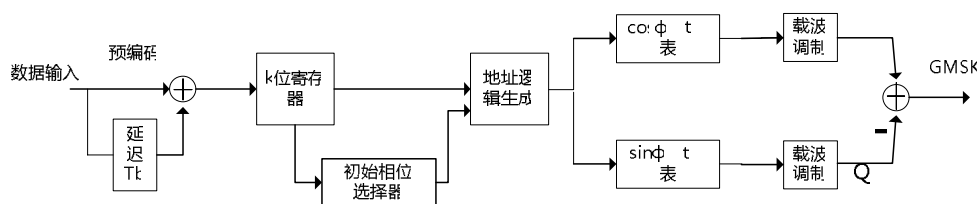


图 2 GMSK 调制的实现结构图

在设计中, 输入的二进制数据进行差分预编码, 即利用相邻码元的相对信息来加载原始数据信息, 这是为了接收端差分相位检测的实现; 将相位路径  $\phi(t)$  离散化, 存储在图中的正弦、余弦相位路径表中, 由输入的二进制数据查找相位路径表即可获得相位路径, 进而获得相应的  $\cos \phi(t)$  和  $\sin \phi(t)$ , 这样就得到了基带 I/Q 信号。经过成型滤波和载波搬移后, 最后就能得到 GMSK 数字已调信号。

方案采用 Altera 公司的 EP3C40F484C8 设计实现 GMSK 数字调制解调器, 开发环境为 Quartus II 10.1, 仿真工具为 Modilsim SE 6.5c<sup>[5]</sup>。码元宽度为  $T_b$  ( $1/T_b = 5\text{Mbit/s}$ ),  $g(t)$  的截短长度为  $5T_b$ ,  $BT_b = 0.3$ ,  $\phi(t)$  的抽样速率为  $40\text{Mbit/s}$  (每个码元内插 8 个点), 量化电平  $Q=14\text{bit/抽样}$ 。通过 Signal Tap 可以在线观察 GMSK 信号的实际情况, 图 3、图 4 分别为 GMSK 调制后的 I 路和 Q 路输出信号, 观察结果表明输出信号波形良好。

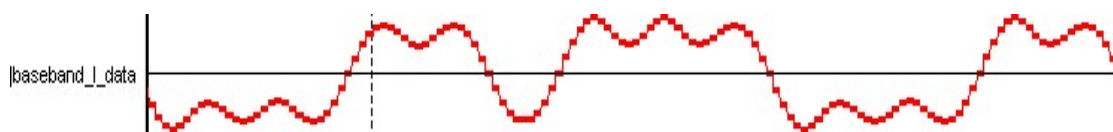


图 3 调制后的 I 路输出信号

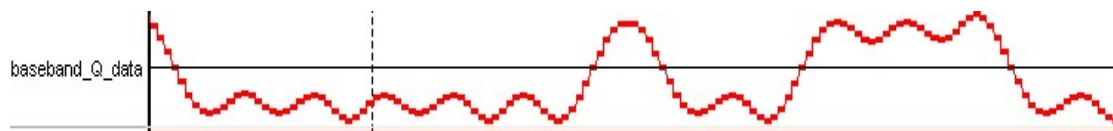


图 4 调制后的 Q 路输出信号

将 I/Q 信号搬移至中频, 经频谱仪观察, 如图 5、6 所示, 可以发现 GMSK 信号比 MSK 信号具有更好的频谱利用率以及旁瓣衰落特性。

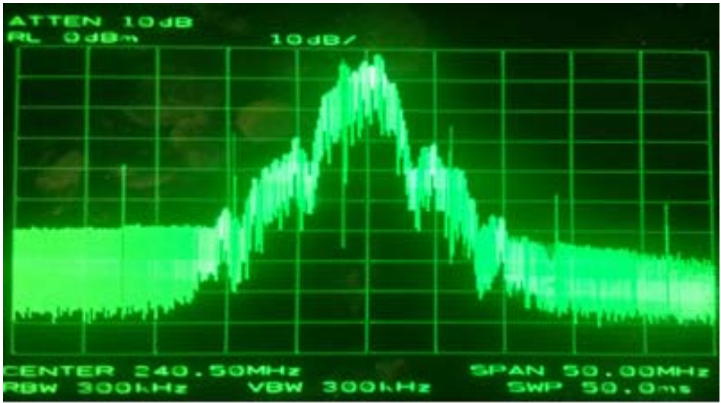


图 5 MSK 已调信号频谱图



图 6 GMSK 已调信号频谱图

3 GMSK 解调的实现

传统的 MSK/GMSK 信号解调采用的是差分相位检测法直接解调。GMSK 信号的  $n$  比特差分解调是在  $n$  个信息码元内，根据当前码元与该码元前的第  $n$  个码元 2 个码元的相关性，来判决发送信号的信息。 $n$  比特差分解调具有原理简单、实现简便的特点，工程中经常采用一比特差分解调和二比特差分解调方式。图 7 显示了一比特差分解调的原理图。

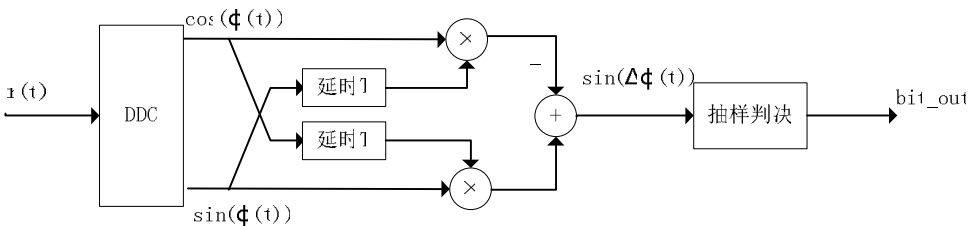


图 7 一比特差分解调原理图

在调制过程中由于高斯滤波器的限带作用，使得 GMSK 信号各码元之间存在码间干扰，所以 GMSK 是一种有记忆的调制。差分检测只是比较相邻两个码元的相位变化，无法利用相邻几个码元对该码元的所用影响信息，仍然受到码间干扰造成的负面影响。对于这种信号，最佳的信号检测应该是对每个符号的检测放在一段间隔时间内做最大似然序列检测。Viterbi 译码算法就是一种最大似然译码算法<sup>[6]</sup>。图 8 为 Viterbi 解调的整体结构图。

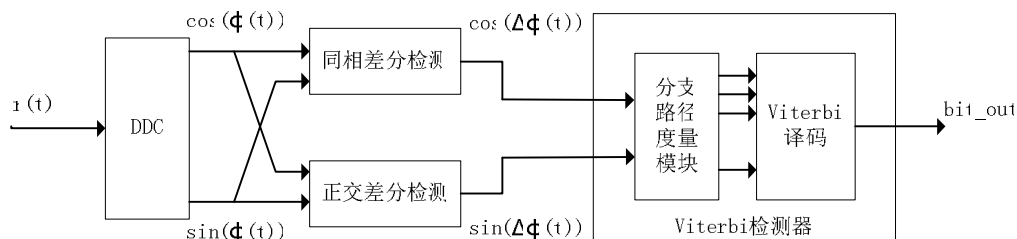


图8 Viterbi解调原理图

115 在调制端，通过差分处理，原始信息被加载到相邻两码相位的相对值中，所以在解调端可以直接检测相位的相对值  $\Delta\phi(t)$ （同时也降低了同步实现的复杂度）。图9为正交和同相差分相位检测具体实现。

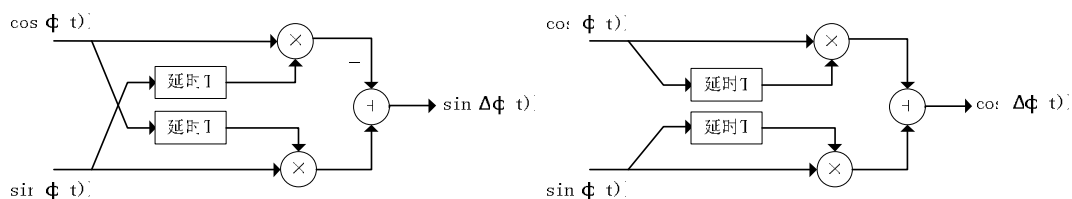


图9 正交和同相差分相位检测结构

120 Viterbi 算法用于 GMSK 解码的思想是先求出 GMSK 的相位路径，用相位路径作为解调路径，将相位路径与所有可能的信息序列做对比，选择最小距离的序列作为判决后的信息序列。这种算法的复杂度与高斯滤波器的 BT 值，也就是 GMSK 信号矩形脉冲响应的近似长度（称为约束长度）有关。

Viterbi 检测模块主要由两部分组成：分支路径度量模块和路径判决模块。其中分支路径度量方法是在每个码元间隔结束的时刻，计算到达每个状态的各个支路的路径度量（将检测出的相位值与所有可能的状态转移对应的相位值进行差值计算），并与上一状态的幸存路径累加获得各状态转移支路的总路径度量，依据路径度量最小的原则来选择该状态的当前幸存路径。

130 对于二进制、约束长度为 L 的序列，需要比较相位路径和  $2^L$  条路径的距离。Viterbi 算法不是在篱笆图上一次比较所有可能的  $2^L$  条路径，而是接收一段，计算、比较一段，选择一段最可能的码段（分支），从而达到整个码序列是一个有最大似然函数的序列。具体步骤如下：

1. 从某一时间单位  $j=m$  开始，对于进入每一状态的所有长为 j 段分支的部分路径，计算部分路径度量。对于每一状态，挑选并存储一条有最大度量的部分路径及其部分度量值，称此部分路径为幸存路径。

135 2. j 增加 1，把此时刻进入每一状态的所有分支度量，和同这些分支相连的前一时刻的幸存路径的度量相加，得到了此时刻进入每一状态的幸存路径，加以存储并删去其它所有路径，因此幸存路径延长了一个分支。

140 3. 若  $j < n$ （要判决的序列长度）则重复以上各步骤，否则停止。译码器得到具有最大路径度量的路径<sup>[7]</sup>。

本设计在做 Viterbi 算法解调中，设置的参数为： $BT_b = 0.3$ ，关联长度： $L=3$ ，回溯长度  $N=9$ 。在 FPGA 内部实现了解调算法部分，综合后的 RTL 图如图 10 所示。

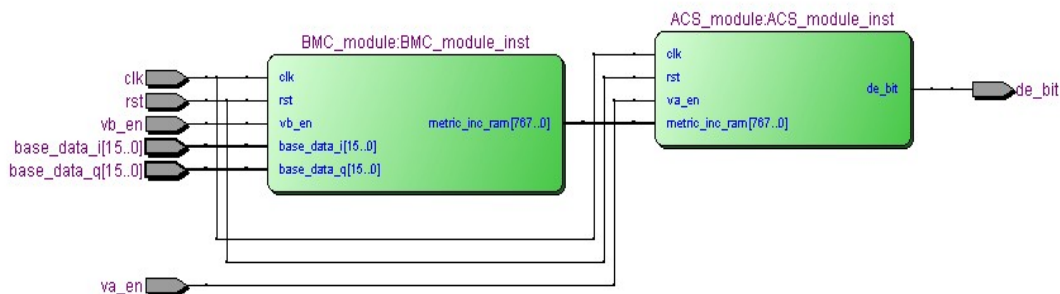


图 10 Viterbi 检测模块综合后的 RTL 代码图

图 11 所示为在高斯白噪声下，GMSK 信号 Viterbi 算法解调、一比特差分分解调、二比特差分分解调和 MSK 最佳解调的误码率曲线。由图 11 中我们可以看到使用 Viterbi 算法解调对 GMSK 信号进行解调具有很好的抗噪声性能，与 MSK 理想误码性能差距 1dB 左右。随着信噪比的不断增大，Viterbi 算法解调性能比差分分解调的性能更好。当信噪比为 10dB 是 Viterbi 算法解调的误码率已经接近  $10^{-4}$ 。在误码率为  $10^{-3}$  时，Viterbi 算法解调较二比特差分分解调可获得 5dB 的系统增益，较一比特差分分解调就有更大的系统增益。这是由于 Viterbi 算法解调时根据相邻的几个码元之间的相关性来解调，而 n 比特差分分解调时根据当前码元与该码元前的第 n 个码元 2 个码元的相关性。

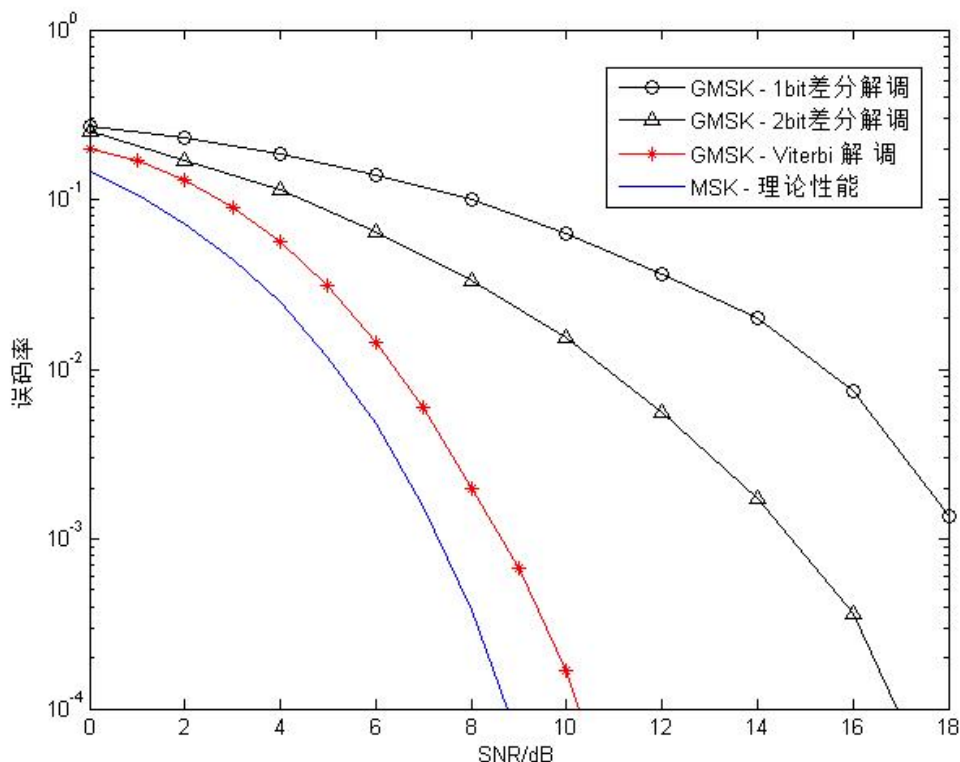


图 11 不同解调方式的误码性能比较

## 4 结束语

GMSK 是一种先进的调制技术，具有包络恒定、相位连续、频谱窄、邻道干扰小及频带利用率高的优点。本文对 GMSK 调制解调系统进行了建模、仿真和分析，设计了一套具有性能优越的系统方案，即形存储调制法和 Viterbi 解调方案，并在 FPGA 上完成了硬件实

现。结果表明, 这种方案具有较高的可靠性, 稳定实现了 GMSK 信号邻道干扰小、误码率  
160 较低的优点, 在通信领域中有着广泛的应用前景。

#### 参考文献:

- [1] 李汉桥, 陈海腾, 姚亚峰. GMSK 调制器电路设计与 FPGA 实现[J]. 电讯技术, 2011, 51 (1): 31-33.  
[2] 熊于菽. GMSK 调制解调技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2007.  
165 [3] Proakis JG. Digital Communication[M]. The Forth Edition. New York: Mc-Graw Hill, 2001.  
[4] 周炯槃, 庞沁华, 续大我等. 通信原理 (第 3 版) [M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2010.  
[5] 陈曦, 邱志成, 张鹏等. 基于 Verilog HDL 的通信系统设计[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.  
[6] 陈旗, 杨允军, 宋士琼. GMSK 信号的非相干解调技术研究[J]. 航天电子对抗, 2007, 23 (1): 58-61.  
170 [7] 毕晓艳. 短波 SFH/GMSK 系统解调技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2005.