

# DRFM 采样过程的频谱分析及仿真

冯存前, 韩英臣, 张永顺  
(空军工程大学 导弹学院, 陕西 三原 713800)

**摘要:**以一位量化 DRFM 为例,对 DRFM 中采样过程进行了分析,得出了经过量化和采样后的频谱含量及幅度的计算式,并对由此式计算出的结果进行了仿真验证,仿真结果同理论分析结果相吻合。可以用同样的方法来分析多位量化 DRFM 的频谱含量及幅度。

**关键词:**DRFM;采样;谐波;交调信号

**中图分类号:**TN97 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-3516(2001)02-0045-03

在 DRFM 的设计中,从下变频器来的基频模拟信号需要经过 A/D 转换变为数字信号,并按一定的时序存储到存储器中,供需要时调用它重构原来的模拟信号。在读取数字信号时可加上欺骗干扰信号以欺骗敌方雷达。本文以量化输出信号作为采样的输入信号,对采样过程进行了分析和仿真。

采样过程是基于奈奎斯特采样定理,而采样定理是假定量化阶梯和采样宽度是无限小的。由于实际电路的限制,由量化产生的谐波失真不可避免<sup>[1]</sup>。同时,由于采样是周期进行的,输入信号的频谱在频域上重复出现。为了防止更高次的谐波和交调信号进入复制信号,一般在 DRFM 的数字系统后加上低通滤波器,称为基带滤波器。只有在 DRFM 基带( $\omega_s/2$ )内的谐波和交调信号才会成为寄生信号。

## 1 采样过程的频谱分析

为简便起见,以一位量化信号作为输入,则由文献[2]知采样前信号为  $f_i(t) = \sum_{n=1}^{\infty} Sa(n\pi/2) \cos n\omega_i t$ ,其中,  $E, \omega_i$  分别为输入信号的幅度和角频率。设采样信号为  $f_s(t)$ ,采样后的信号为  $f_o(t)$ ,则采样过程如图 1 所示。显然,采样过程在时域上的数学表示式为

$$f_o(t) = f_i(t) \times f_s(t)$$

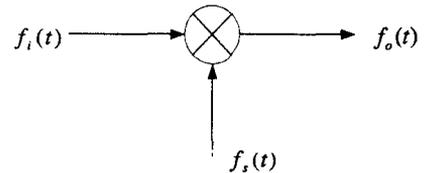


图 1 采样过程等效图

先来分析一下  $f_s(t)$  的表达式及付立叶级数。在 DRFM 中采用等间隔均匀采样,采样周期为  $T_s$ ,采样时钟频率为  $\omega_s = 2\pi f$ 。在实际电路中,采样是在采样脉冲上升的瞬间完成的。因此采样脉冲的宽度可以看成是一个窄脉宽,用  $\tau_s$  来表示。采样脉冲  $f_s(t)$  的付立叶级数容易得到:

$$f_s(t) = \frac{E_s}{T_s} \tau_s + \frac{2E_s}{T_s} \tau_s \sum_{m=1}^{\infty} Sa\left(\frac{m\pi\tau_s}{T_s}\right) \cos m\omega_s t$$

其中,  $E_s, \tau_s, T_s$  和  $\omega_s$  分别为采样信号的幅度、脉宽、周期和角频率。

则:  $f_o(t) = f_i(t) \times f_s(t) =$

$$E \sum_{n=1}^{\infty} Sa\left(\frac{n\pi}{2}\right) \cos n\omega_i t \times \frac{E_s}{T_s} \tau_s \left[ 1 + 2 \sum_{m=1}^{\infty} Sa\left(\frac{m\pi\tau_s}{T_s}\right) \cos m\omega_s t \right] =$$
$$E \sum_{n=1}^{\infty} Sa\left(\frac{n\pi}{2}\right) \cos n\omega_i t \times \frac{E_s}{T_s} \tau_s \left[ 1 + 2 \sum_{m=1}^{\infty} Sa\left(\frac{m\omega_s \tau_s}{2}\right) \cos m\omega_s t \right]$$

整理,得:

收稿日期:2000-08-02

作者简介:冯存前(1975-),男,陕西富平人,博士生,主要从事防空武器系统电子对抗研究。

$$f_o(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{E_s \tau_s E}{T_s} \text{Sa}\left(\frac{n\pi}{2}\right) \cdot \cos n\omega_i t + \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{E_s \tau_s E}{T_s} \text{Sa}\left(\frac{n\pi}{2}\right) \cdot \text{Sa}\left(\frac{m\omega_s \tau_s}{2}\right) \cdot \cos(m\omega_s + n\omega_i)t + \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{E_s \tau_s E}{T_s} \text{Sa}\left(\frac{n\pi}{2}\right) \cdot \text{Sa}\left(\frac{m\omega_s \tau_s}{2}\right) \cdot \cos(m\omega_s - n\omega_i)t \quad (1)$$

在上式中,第一项是基带的谐波信号,是由量化所产生的频谱成分,只有在基带滤波器内的谐波将成为寄生信号,所有  $n\omega_i > \omega_s/2$  的项将被滤除( $n$ 取奇数);第二项则完全在滤波器外,不用考虑;第三项是交调信号,满足  $m\omega_s - n\omega_i < \omega_s/2$  的所有成分,将成为交调寄生信号,它们是信号谐波与时钟谐波的交叉调制引起的。

若忽略第二项,则式(1)变为:

$$f_o(t) = \sum_{n=1}^{\infty} P_n \cos n\omega_i t + \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} Q_{m,n} \cos(m\omega_s - n\omega_i)t \quad (2)$$

其中: 
$$P_n = \frac{E_s \tau_s E}{T_s} \text{Sa}\left(\frac{n\pi}{2}\right) \quad (3)$$

$$Q_{m,n} = \frac{E_s \tau_s E}{T_s} \text{Sa}\left(\frac{n\pi}{2}\right) \text{Sa}\left(\frac{m\omega_s \tau_s}{2}\right) \quad (4)$$

(3)、(4)两式即为计算单比特量化 DRFM 的高次谐波和交调信号幅度的方法。用同样的方法也可以求出多位量化 DRFM 的高次谐波和交调信号幅度的公式。

## 2 仿真验证

采用 MATLAB 语言软件中的 SIMULINK 软件包对量化采样过程进行仿真验证。

用公式(3)、(4)计算几组不同的  $\omega_i/\omega_s$  值时的谐波及交调信号。在这里,考虑一个瞬时带宽为 100 MHz 的 DRFM,则其采样频率可假定为  $f_s = 201$  MHz,基带滤波器带宽为 100.5 MHz。在计算时,设时钟信号占空比为 0.1,即  $\tau_s/T_s = 0.1$ ,并且当寄生信号电平低于 -20 dB 时一般不予列出。

当  $f_i = 6$  MHz 时,  $\omega_i/\omega_s = f_i/f_s = 0.0299$ 。

根据  $n\omega_i < \omega_s/2$ ,在基带滤波器内的谐波有  $n = 1, 3, 7, 9$  次;

根据  $m\omega_s - n\omega_i < \omega_s/2$ ,在基带滤波器内的交调分量有  $m = 1, n = 17$  时的交调等其它的交调分量,但其电平平均小于 -20 dB。

计算结果如表 1 示。图 2 是这种情况的仿真结果。由此图可看出输出频谱中主要是输入信号的基波及各奇次谐波,与理论分析一致。

表 1  $f_i = 6$  MHz,  $\omega_i/\omega_s = 0.0299$  时计算结果

| 信号 | 阶数                | 频率 (MHz) | 电平 (dB)    |
|----|-------------------|----------|------------|
| 谐波 | $n = 1$           | 6        | 0          |
|    | $n = 3$           | 18       | -9.54      |
|    | $n = 5$           | 30       | -13.98     |
|    | $n = 7$           | 42       | -16.9      |
|    | $n = 9$           | 54       | -19.1      |
| 交调 | $m = 1, n = 17$ 等 | 98       | 均小于 -20 dB |

同理,当  $f_i = 18$  MHz,  $\omega_i/\omega_s = 0.09$  时和当  $f_i = 36$  MHz,  $\omega_i/\omega_s = 0.18$  时的结果分别如表 2 和表 3 所示。仿真结果如图 3 和图 4 所示。

表 2  $f_i = 18$  MHz,  $\omega_i/\omega_s = 0.09$  时计算结果

| 信号 | 阶数              | 频率 (MHz) | 电平 (dB) |
|----|-----------------|----------|---------|
| 谐波 | $n = 1$         | 18       | 0       |
|    | $n = 3$         | 54       | -9.54   |
|    | $n = 5$         | 90       | -13.98  |
| 交调 | $m = 1, n = 17$ | 75       | -17.04  |

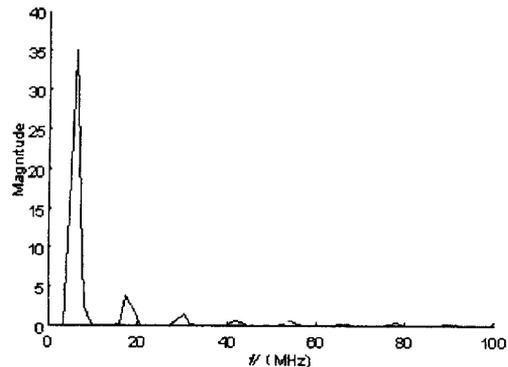


图 2 输入频率 6 MHz, 采样频率 201 MHz 时的输出频谱

表 3  $f_i = 36$  MHz,  $\omega_i/\omega_s = 0.18$  时计算结果

| 信号 | 阶数             | 频率 (MHz) | 电平 (dB) |
|----|----------------|----------|---------|
| 谐波 | $n = 1$        | 18       | 0       |
| 交调 | $n = 1, n = 3$ | 93       | -9.69   |
|    | $n = 1, n = 5$ | 21       | -14.12  |
| 调  | $n = 2, n = 9$ | 78       | -19.66  |

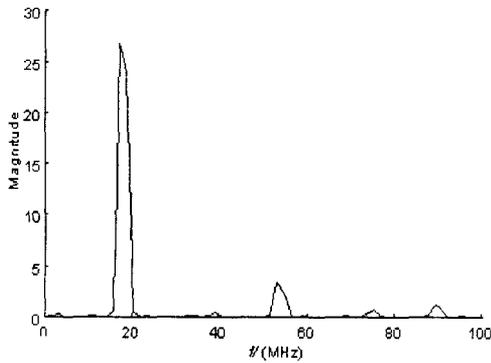


图3 输入频率 18MHz、采样频率 201MHz 时的输出频谱

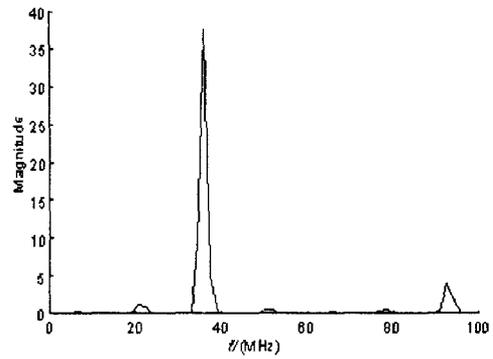


图4 输入频率 36MHz、采样频率 201MHz 时的输出频谱

### 3 结论

1) 仿真结果同理论分析的结果相吻合,表明前面对 DRFM 的频谱分析是正确的。对于给定的  $\omega_i/\omega_s$ , 利用上面两式就可以方便地求出在基带内的谐波和交调信号。

2) 由分析可知,DRFM 输入信号经采样后,其频谱再次发生畸变(在此前由于量化使得频谱发生畸变而产生了谐波),使得其频谱中不仅包含有输入信号的基频以及它的高次谐波,而且还包含高次谐波与采样信号各次谐波交调产生的交调分量。

3) 从上面三组的计算、仿真结果来看,随着输入频率与采样频率比值不断地增加,基带内的高次谐波逐渐减少,交调分量逐渐增多,因而无法用传统的低通滤波器将这些交调分量滤除,且这些交调成分的输入频率之间并非整数倍关系。因此使输出频谱变得复杂,给频谱分析带来一定困难,并且由于一部分发射功率转移到杂散频谱上而降低发射效能。所以,应尽量采用比较高的采样频率来减少交调分量。

#### 参考文献:

- [1] 陈 宁. DRFM 的寄生信号谱结构[J]. 电子对抗技术,1998,13(1):9-13.
- [2] 冯存前. 数字射频存储(DRFM)技术的研究[D]. 西安:空军工程大学导弹学院,2000.
- [3] 冯存前,张永顺. DRFM 中由幅度量化产生的寄生信号分析[J]. 西北大学学报,1999,29(6):55-57.

## Analysis and Emulation of Spectrum in Sampling Process of DRFM

FENG Cun-qian, HAN Ying-chen, ZHANG Yong-shun

(The Missile Institute of the Air Force Engineering University, Sanyuan 713800, China)

**Abstract.** Taking one-bit quantized DRFM for example, the sampling process in DRFM is analyzed, the formulas of spectrum contents and amplitude are provided, which are produced by quantization and sampling, and the result calculated with the formulation is proved by the emulation, the conclusion of emulation is coincided with the result of the analysis. The same method can be used to analyze the spectrum contents and amplitude of Multiple-bit DRFM.

**Key words:** digital RF memory(DRFM); sampling; harmonic wave; intermodulation signal