

波形存储 LFM 信号源设计误差分析

田新远 董戈 朱敏慧

(中国科学院电子学研究所微波成像国家重点实验室 北京 100080)

摘要: 该文分析了波形存储 LFM 信号源设计中数据量化精度、时钟抖动、D/A 器件的线性误差和调制器、滤波器、放大器的输出特性误差对 LFM 信号雷达脉冲压缩结果旁瓣电平的影响,给出了量化关系式和数据,为实际工程设计提供了参考。

关键字: 线性调频, 量化精度, 时钟抖动, 线性误差

中图分类号: TN782

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2005)08-1240-04

Analysis of Errors in Waveform Storage LFM Generator Design

Tian Xin-yuan Dong Ge Zhu Min-hui

(The National Key Laboratory of Microwave Imaging Technology, The Institute of Electronics,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract In waveform storage LFM generator design, quantization precision, clock jitter, D/A converter linear error and output performance distortion cause rise of side label in pulse compression result. The paper analyses these effects and gives quantized results providing valuable reference for engineering design.

Key words LFM, Quantization precision, Clock jitter, Linear error

1 引言

线性调频 (Linear Frequency Modulation, LFM)信号具有良好的脉冲压缩特性,有效地解决了雷达作用距离和分辨力之间的矛盾,广泛应用于现代脉冲压缩雷达系统中。LFM 信号源在设计过程中不可避免地引入了系统误差,造成 LFM 信号波形畸变,直接影响到雷达的脉冲压缩结果。

产生 LFM 信号的方法很多,波形存储法是目前被广泛采用的一种 LFM 信号源设计方法,它将理论 LFM 信号波形数据量化后存储在存储器内,在数字时钟控制下进行读取,并经过 D/A 转换、中频调制、滤波和放大得到中频模拟 LFM 信号。这种信号源具有较高的精确度、较强的抗干扰能力和较高的稳定性,同时 LFM 信号参数可以通过改变存储器内的波形数据得到重新配置,所以具有一定的灵活性。但是每一种方法都会有其缺点,波形存储 LFM 信号源设计过程中的数据量化精度、时钟抖动、D/A 器件的线性误差和调制器、滤波器、放大器的输出特性误差都会造成 LFM 信号波形畸变,从而影响雷达脉冲压缩结果。

本文针对波形存储 LFM 信号源设计过程中可能引入信号波形误差的因素进行分析,研究误差因素和衡量脉冲压缩质量重要指标之一的旁瓣电平的量化关系,为实际系统设计

提供参考。文中在分析脉冲压缩结果时暂且不考虑其它雷达信号处理措施对压缩结果的影响。

2 波形数据量化误差

波形存储 LFM 信号源设计的第一步就是对 IQ 两路理想的正交 LFM 信号波形进行抽样量化,使其在时间和幅度上都成为能够在数字电路中进行处理的离散数据流。这种方法不可避免地引入了信号波形的幅度和相位量化误差,会对雷达脉冲压缩结果产生不良影响。量化位数 N 直接决定了波形误差大小,从而与雷达脉冲压缩结果直接相关。

2.1 波形量化误差模型

在实际的系统设计时,理想的幅度归一化 LFM 信号的波形量化数据尾数都是用四舍五入的方法来处理的,由基本的量化理论可以知道量化误差 $e(N)$ 满足:

$$-\Delta/2 \leq e(N) \leq \Delta/2 \quad (1)$$

其中 N 为量化位数, Δ 为量化间隔:

$$\Delta = 2^{-N} \quad (2)$$

于是单路信号量化幅度误差最大值 $e_{1\max}$ 为

$$e_{1\max}(N) = \Delta/2 = 2^{-N-1} \quad (3)$$

IQ 两路正交 LFM 信号幅度量化误差最大值 $e_{2\max}$ 应为

$$e_{2\max}(N) = \sqrt{2}e_{1\max} = 2^{-N-(1/2)} \quad (4)$$

根据文献[1]经过推导在 $N > 4$ 时其最大值可由下式^[2]近似给出

$$\varphi_{\max}(N) = \arctan\left(\frac{1}{2^N - 1}\right) \quad (5)$$

假设量化噪声具有简谐形式, 我们可以建立下面的量化误差模型:

$$e(N, t) = 2^{-N-(1/2)} \cos(\omega_e t) \quad (6)$$

$$\varphi(N, t) = \arctan\left(\frac{1}{2^N - 1}\right) \cos(\omega_p t) \quad (7)$$

其中 ω_e , ω_p 分别为量化引起的幅度和相位误差的角频率, t 为时间。

2.2 量化误差对脉冲压缩结果的影响

由雷达成对回波理论^[3]可以知道, 上述两项误差引起的成对回波造成的雷达脉冲压缩结果旁瓣电平升高分贝数为

$$SL = 20 \lg \left[2^{-N-(3/2)} + \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{1}{2^N - 1}\right) \right] \quad (8)$$

这里的分析并没有考虑脉冲压缩过程中其他处理过程的影响。

表 1 中列出了不同量化位数时造成的脉冲压缩旁瓣升高电平值以便在系统设计时根据旁瓣电平的指标要求选择合适的量化位数。

表 1 量化位数 N 与压缩旁瓣电平 SL 的对应关系

$N(\text{bit})$	4	8	10	12	14	16
SL(dB)	-25.1	-49.5	-61.6	-73.6	-85.7	-97.7

3 系统时钟抖动

LFM 波形数据是根据理论抽样频率产生的, 但在实际的 LFM 信号源中这些离散数据是在系统时钟的控制下读取的, 由于时钟的抖动, 读出的信号波形会发生畸变, 这种畸变的大小与时钟的抖动程度是密切相关的。

3.1 时钟抖动引起的相位误差

时钟的抖动可以用晶体振荡器的频率精确度 A 来表示:

$$A = \Delta f / f_0 \quad (9)$$

其中 Δf 为某时刻晶体振荡器输出频率与标称频率之间的偏差值, f_0 为理想输出频率值, 亦即标称频率。

在 $A \ll 1$ 时对时钟存在以下关系:

$$\Delta T = (\Delta f / f_0) T_0 = A T_0 \quad (10)$$

其中 ΔT 为对应于 Δf 的时钟周期偏差, T_0 为对应于 f_0 的时钟标称周期。

为便于讨论, 我们这里假设时钟频率偏移 Δf 始终不小于 0 (实际情况中 Δf 的正负是不确定的), 而且由于一般的晶体振荡器的短期频率稳定度 (一定时间内晶体振荡器频率精确度的方差) 都较小, 所以可以暂且认为 A 是恒定的。

幅度归一化的 LFM 信号原始波形量化数据可以表示成如下形式:

$$s(n) = e^{j\pi k n^2 T_0^2} \quad (11)$$

其中 n 为整数且 $-(M-1)/2 \leq n \leq (M-1)/2$, M 为信号波形量化点数。

若 T 为 LFM 信号持续时间则有 $T = M T_0$ 。

考虑时钟频率偏差时存储器读出的波形离散数据为

$$s'(n) = e^{j\pi k \left[n T_0 + \left(n + \frac{M-1}{2} \right) \Delta T \right]^2} \quad (12)$$

在 $A \ll 1$ 时我们忽略掉带 A^2 的项, 得到波形存储 LFM 信号源输出的模拟信号 ($t = n T_0$) 为

$$s'(t) \approx e^{j\pi k t^2 + j\pi k 2 A t^2 + j\pi k A T t + \frac{1}{4} A^2 T^2}, \quad -(T/2) \leq t \leq (T/2) \quad (13)$$

从式(13)可以看出时钟的抖动给 LFM 信号波形引入了固定相位差、一次相位误差和二次相位误差。固定相位差对 LFM 信号的压缩没有任何影响, 所以我们这里将其忽略。下面我们研究时钟抖动引起的一次相位误差和二次相位误差对脉冲压缩结果的影响。

3.2 时钟抖动对脉冲压缩结果的影响

根据脉冲压缩雷达理论^[3]我们知道, 时钟抖动造成的一次相位误差只会引起 LFM 信号脉冲压缩结果的波形在时间轴上平移, 移动的距离为 $(1/2)AT$, 亦即时钟抖动只会影响脉冲压缩结果的位置, 而对其形状无任何影响。

二次相位误差畸变信号形式:

$$s_2(t) = e^{j\pi k t^2 + j\pi k 2 A t^2}, \quad -(T/2) \leq t \leq (T/2) \quad (14)$$

由脉冲压缩雷达理论^[3]可以知道, 脉冲压缩输出结果的包络为

$$E_{\text{env}}[s_{\text{sc}}(t)] = |C(P) - C(Q) + j[S(P) - S(Q)]| \quad (15)$$

式中 $s_{\text{sc}}(t)$ 为脉冲压缩输出信号,

$$P = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{t}{2\sqrt{\pi A/k}} + \sqrt{\pi k A T} \right), \quad Q = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{t}{2\sqrt{\pi A/k}} - \sqrt{\pi k A T} \right),$$

$C(\bullet)$ 和 $S(\bullet)$ 表示菲涅耳积分。

图 1 中画出了时钟抖动时雷达脉冲压缩结果。图 1(a) 中 k 为 $1.82 \times 10^{12}/\text{s}^2$, 自上而下依次为 A 为 1×10^{-4} , 5×10^{-5} , 5×10^{-6} 时的脉冲压缩结果包络波形; 图 1(b) 中自上而下依次画出了 A 为 5×10^{-5} , 2×10^{-5} , 5×10^{-6} 时脉冲压缩波形旁瓣电平随调频斜率的变化:

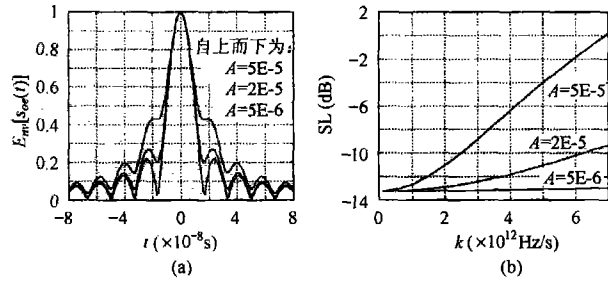


图1 时钟抖动对脉冲压缩旁瓣的影响

从图1中可以看出对于这样的 LFM 信号, 时钟抖动 A 越大, 脉冲压缩结果的畸变就越严重, 主要表现在主瓣展宽, 旁瓣电平升高。一般情况下 A 较小, 旁瓣电平升高是主要影响; 相同的时钟抖动 A , 脉压结果旁瓣也会随调频斜率的增大而升高。

从图1还可以发现, 当 A 在 10^{-6} 量级时引起的压缩结果旁瓣电平升高几乎可以忽略不计。目前大部分晶体振荡器都可以达到这样的频率精度, 所以我们一般在 LFM 信号波形存储发生器设计中可以忽略时钟抖动对脉冲压缩结果的影响。

4 D/A 线性误差

在波形存储 LFM 信号源中, 存储器中的波形数据由时钟控制读出, 并经过数模转换器(Digital to Analog Converter, D/A)得到基带模拟 LFM 信号, 其精度不仅由量化数据本身的精度决定, 而且也会受到 D/A 的转换精度(以输入数据量化位数表示)和线性误差的影响。一般地, D/A 的转换精度是和波形数据量化精度相匹配的, 所以它引起的 LFM 信号波形畸变等效于第2节中波形数据量化造成的畸变。一般 D/A 都有一定的线性误差质量指标, 该指标直接影响输出模拟信号的波形, 下面就详细分析这种影响。

4.1 D/A 线性误差的定义

D/A 的线性误差是一个表示由各种因素引起 D/A 转换误差的综合性指标, 有时也叫 D/A 转换误差, 它表示实际的 D/A 转换特性与理想特性之间的最大偏差, 以转换精度是 4bit 的 D/A 为例, 图2给出了 D/A 线性误差的定义。图2中的虚线表示理想的 D/A 转换特性, 它是连结坐标原点和满量程(输入为全1)理论值的一条直线, 实线表示实际可能的 D/A 转换特性。线性误差就是图中所示的 Δv_o 的最大值。

一般用最低有效位(LSB)的倍数 m LSB 表示 D/A 的线性误差。假设 D/A 转换精度为 N bit, 内部参考电压为 V_r , 则与 m LSB 对应的输出电压的绝对值为

$$|\Delta v_o| = \frac{m}{2^N} |V_r| \tag{16}$$

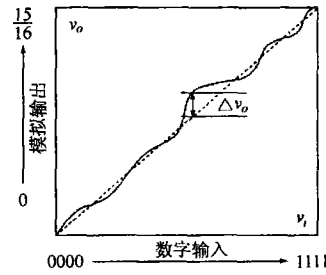


图2 D/A 转换器的转换特性曲线^[4]

便于理论分析我们假设 D/A 这种线性误差是简谐形式的, 则可以得到 D/A 输出波形的幅度误差为

$$\Delta v_o = \left(\frac{m}{2^N}\right) |V_r| \cos(\omega_d t) \tag{17}$$

其中 ω_d 为量化误差波动的频率。

同时我们知道转换精度为 N bit D/A 的输出电压最大幅值为

$$|v_o|_{\max} = \left[\frac{2^N - 1}{2^N}\right] |V_r| \tag{18}$$

4.2 线性误差对脉冲压缩结果的影响

根据经典雷达成对回波理论^[3], 上述输出波形幅度误差在脉冲压缩结果的主瓣两侧产生了左右对称的成对回波, 由此造成的峰值旁瓣电平升高分贝数为

$$SL = 20 \lg \left[\frac{m}{(2^{N+1} - 2)} \right] \tag{19}$$

画出不同 m 时的 $SL \sim N$ 图线和不同 N 时的 $SL \sim m$ 图线如图3所示。

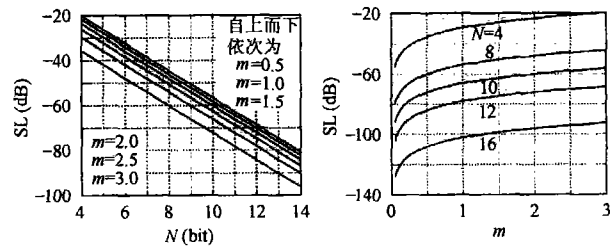


图3 D/A 线性误差对脉冲压缩结果的影响

从图3中可以看出: D/A 的线性误差对脉冲压缩结果的影响不仅与其大小有关, 还与 D/A 转换精度有关: 线性误差相同, 转换精度越高, 影响越小; 转换精度相同, 线性误差越大, 影响越大; N 对脉冲压缩结果的影响程度更大一点。由图3我们也可以根据实际设计指标需要为系统设计选择合适的 D/A。

5 调制器、带通滤波器和放大器特性波动影响

波形存储 LFM 信号源产生的基带模拟 LFM 信号经过 IQ

调制器调制到中频, IQ 调制器中不可避免地存在寄生参量, 例如分布电容和引线电感等, 这将使调制器不可能输出理想的矩形波形, 而是顶部有幅度波动^[5], 同时输出信号还存在相位误差。受这两种误差的影响, LFM 信号的脉冲压缩结果将会产生畸变。

中频模拟 LFM 信号必须经过带通滤波和放大, 带通滤波器带内波动^[6]以及放大器幅度特性波动的大小与输出 LFM 信号的质量密切相关, 进而会对脉冲压缩结果产生影响。

假设调制器幅度波动和相位波动、带通滤波器带内波动和放大器幅度波动都具有简谐形式, 幅度为 γ (幅度归一化或相位弧度数), 则根据成对回波理论^[3], 可以得到这些误差造成的脉冲压缩结果旁瓣电平升高均是

$$SL = 20 \lg(\gamma/2) \quad (20)$$

由此可知, 误差大小与造成的旁瓣电平成简单的对数关系。假设雷达系统设计时要求旁瓣电平低于 SL_0 (dB), 则可以求得相应误差幅度的容限:

$$\gamma_{\max} = 2 \times 10^{SL_0/20} \quad (21)$$

根据式(21), 表 2 给出了 $SL_0 \sim \gamma_{\max}$ 的对应关系, 以便进行实际系统设计时参考。

表 2 不同设计指标时的幅度误差容限

SL_0 (dB)	- 10	- 20	- 30	- 40
γ_{\max}	0.6325	0.2000	0.0632	0.0200
SL_0 (dB)	- 50	- 60	- 70	- 80
γ_{\max}	0.0063	0.0020	0.0006	0.0002

6 总结

通过上面的分析可以得出以下结论:

(1)波形存储 LFM 信号源中波形数据量化会给 LFM 信号引入幅度和相位误差造成脉冲压缩结果旁瓣电平抬高, 抬高分贝数与量化位数成如式(8)所示的复杂对数关系, 同时也得

到了不同设计指标要求时应该采用的量化位数(表 1);

(2)时钟抖动会给 LFM 信号引入一次相位误差和二次相位误差, 二次相位误差会抬高脉冲压缩结果的旁瓣, 但在实际系统设计中这种影响可以忽略不计;

(3)D/A 转换器的线性误差会给 LFM 信号引入幅度误差, 也造成脉冲压缩结果旁瓣电平抬高, 抬高分贝数与 D/A 器件的量化位数和线性误差成如式(19)所示的复杂对数关系;

(4)模拟 LFM 信号在中频调制、带通滤波和后续放大时, 由于器件特性偏离理想值而给 LFM 信号引入误差, 同样会造成脉冲压缩结果旁瓣电平的抬高, 特性误差和旁瓣电平抬高电平成式(20)所示的关系, 同时也得到了满足不同设计要求时的误差容限(表 2)。

参 考 文 献

- [1] Abousetta M M. Noise analysis of digitized FMCW radar waveforms. *IEE Proc.-Radar, Sonar and Navigation*, 1998, 145(4): 209 - 215.
- [2] 张群英, 杨学贤, 何佩琨, 毛二可. AD 量化误差对脉冲压缩结果的影响. *现代雷达*, 2000, 4(2): 63 - 68.
- [3] 张澄波. 综合孔径雷达原理、系统分析与应用. 第一版, 北京: 科学出版社, 1989: 127, 152, 165 - 166.
- [4] 阎石. 数字电子技术基础. 第四版, 北京: 高等教育出版社, 1998.11, 第九章.
- [5] 许建木. 发射机脉冲调制器的探讨. *电子产品可靠性与环境试验*, 2002, 12(6): 17 - 21.
- [6] 曾志华, 贾新章, 刘宁, 李晓亮. 带通滤波器的优化设计和可制造性分析. *西安电子科技大学学报(自然科学版)*, 2003, 30(1): 66 - 70.

田新远: 男, 1978 年生, 硕士生, 研究方向为 LFM 信号产生技术.

董 戈: 男, 1971 年生, 副研究员, 研究方向为微波技术与设备.

朱敏慧: 女, 1943 年生, 研究员, 研究方向为信号与信息处理.