

LFM 信号误差对 SAR 成像的影响分析¹

张群英 杨学贤*

(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

*(中国科学院计算技术研究所 北京 100086)

摘要 该文讨论了线性调频信号频率线性度的定义,分析了线性调频信号数字产生过程中,频率线性度、相位误差、幅频特性不平坦产生的原因以及对 SAR 成像的影响,给出了计算机仿真结果。

关键词 线性调频, 频率线性度, 幅频不平坦, 相位误差

中图分类号 TN951

1 引言

线性调频 LFM(Linear Frequency Modulation) 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率的矛盾,广泛地应用在线性调频连续波雷达、脉冲压缩雷达、合成孔径雷达 SAR(Synthetic Aperture Radar) 以及逆合成孔径雷达 ISAR(Inverse Synthetic Aperture Radar) 中。随着对雷达距离分辨率以及测距精度要求的不断提高,以前不太引人注目的问题变得越来越突出了。这些问题就是 LFM 信号的非理想性,包括 LFM 信号的调频非线性、相位误差以及幅频特性不平坦。

由于模拟无源及有源 LFM 信号产生技术的限制,很难获得期望频率线性度和平坦的 LFM 脉冲,特别是在高分辨雷达成像系统需要大带宽信号的时候。模拟法产生规定线性的大时间带宽积 LFM 脉冲时,通常需要频率线性化,温度控制和校准^[1]。这样使系统复杂化并出现可靠性问题。现在,可以利用波形数字存储直读技术和数字频率直接合成 DDS(Direct Digital Synthesis) 技术产生良好线性的可重复 LFM 脉冲,而且由于信号在数字域中产生,其相位、频率、及接通或断开时间都可由稳定的时钟频率控制,因而,雷达系统全部 LFM 信号带宽上的相位和幅度起伏能得到合适的补偿。数字方法是目前和将来产生 LFM 信号主要方法,所以本文以数字线性调频源为基础,讨论上述 3 个因素产生的原因及其对 SAR 成像的影响。

2 频率线性度

不少文献都讨论了不同类型雷达中, LFM 信号的线性度与距离分辨率的关系以及对距离分辨率的影响。文献 [2] 推导了线性调频连续波雷达中, LFM 信号的线性度与距离分辨率的近似关系。文献 [3] 给出了线性调频连续波雷达中,调频非线性对距离分辨力影响的数学表达式。文献 [4] 讨论了调频非线性对 ISAR 成像的影响。本文将探讨非线性对 SAR 成像的影响,使设计者根据雷达所要求的距离分辨率,对 LFM 信号源的线性度提出合理的指标要求。

理想的 LFM 信号频率 $f_0(t) = K_0 \cdot t$, K_0 为一常数。实际中的线性调频源输出的信号,其频率随时间的变化 $f(t)$ 总是与理想的 $f_0(t)$ 有偏离。这种偏离相当于在 K_0 上叠加了一个时间函数。 $f(t)$ 与 $f_0(t)$ 之间的差别定义为 LFM 信号的频率偏移函数 $F(t)$ 。 $F(t)$ 存在各种各样的可能性,既有可能是一种近似为高频正弦信号的抖动,也可能为可重复的周期信号,或不规则的起伏。

如果理想 LFM 信号 $s_0(t)$ 表示为

$$s_0(t) = u(t) \exp(jk_0 \pi t^2), \quad -T/2 \leq t \leq T/2 \quad (1)$$

¹ 2001-08-21 收到, 2002-04-25 改回

其中 $u(t) = (1/\sqrt{T})\text{rect}(t/T)$, $k_0 = B/T$, B 为信号带宽, T 为信号脉宽. 此处没有考虑载频. 频率非线性的 LFM 信号 $s_1(t)$ 为

$$s_1(t) = u(t) \exp[j\pi(k_0 t + F(t))t] \quad (2)$$

假设 $F(t)$ 为周期信号, 其周期为 T' , 则可以用傅里叶级数表示成^[3]

$$F(t) = \frac{F_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} F_n(\sin \Omega_n t + \varphi_n) \quad (3)$$

式中 $\Omega_1 = 2\pi/T'$, $\Omega_n = n\Omega_1$.

$$s_1(t) = u(t) \exp[j\pi(k_0 t + F(t))t] = u(t) \exp \left[j\pi \left(k_0 t + \frac{F_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} F_n(\sin \Omega_n t + \varphi_n) \right) t \right] \quad (4)$$

由上式可以看出: 频率非线性对距离分辨力的影响不仅与频率偏移函数 $F(t)$ 的最大幅值 $|F(t)|_{\max}$ 有关, 还与它的频率分量的大小有关.

为了得到频率偏移函数 $F(t)$ 的最大幅值 $|F(t)|_{\max}$ 以及它的频率分量的大小对 SAR 距离向成像的影响, 下面分别对两种情况进行仿真.

为了便于讨论, 首先应给出 LFM 信号频率线性度的定义. 文献 [2] 给出 LFM 信号的线性度 δ 定义为

$$\delta = |F(t)|_{\max}/B \quad (5)$$

其中 $|F(t)|_{\max}$ 是频率偏离函数 $F(t)$ 的最大绝对值, B 是调频带宽.

下面的仿真中将 LFM 信号的频率线性度定义为

$$\eta = |F(t)|_{\max}/K_0 \quad (6)$$

图 1 的仿真条件为 $B=30\text{MHz}$, $T = 33\mu\text{s}$; 只考虑频率偏移函数的相同次谐波. 在扫频线性度 (最大幅值) 不同情况下的仿真结果如图 1 所示 (下文所有仿真图中的横坐标为距离向处理点数, 纵坐标为幅度 (dB)).

图 1(a) 为理想 LFM 信号距离向的脉压结果; 图 1(b) 为 LFM 信号的扫频线性度 $\eta = 1.1 \times 10^{-14}$ 时距离向的脉压结果; 图 1(c) 为 $\eta = 5 \times 10^{-14}$ 时距离向的脉压结果; 图 1(d) 为 $\eta = 11 \times 10^{-14}$ 时距离向的脉压结果. 由上面的仿真结果可以看出: 频率偏移函数在频率一定的情况下, 随着偏离幅度的增加, 对脉压结果最为明显的影响是旁瓣增加, 这将直接影响 SAR 的距离分辨力.

图 2 的仿真条件为 $B=30\text{MHz}$, $T = 33\mu\text{s}$; 在频率线性度 (最大幅值) 相同情况下, 频率偏移函数中不同谐波对脉压结果影响的仿真结果 (如图 2 所示). 图 2(a) 为频率偏移函数中 5 次谐波对距离向的脉压结果的影响; 图 2(b) 为 10 次谐波对距离向的脉压结果的影响; 图 2(c) 为 15 次谐波对距离向的脉压结果的影响; 图 2(d) 为 20 次谐波对距离向的脉压结果的影响. 由上述的仿真结果看出: 频率偏移函数的各个频率分量对脉压结果最为明显的影响是在主瓣的两侧出现明显的尖峰, 并且随着谐波次数的增大, 尖峰越远离主瓣. 实际中, 各次谐波的振幅随着谐波次数的增加而逐渐减小, 所以高次谐波对脉压结果的影响越来越小. 所有谐波对距离向的脉压结果的影响叠加起来后, 最终表现为积分旁瓣的上升, 这影响到 SAR 图像的对比度以及对弱目标的成像.

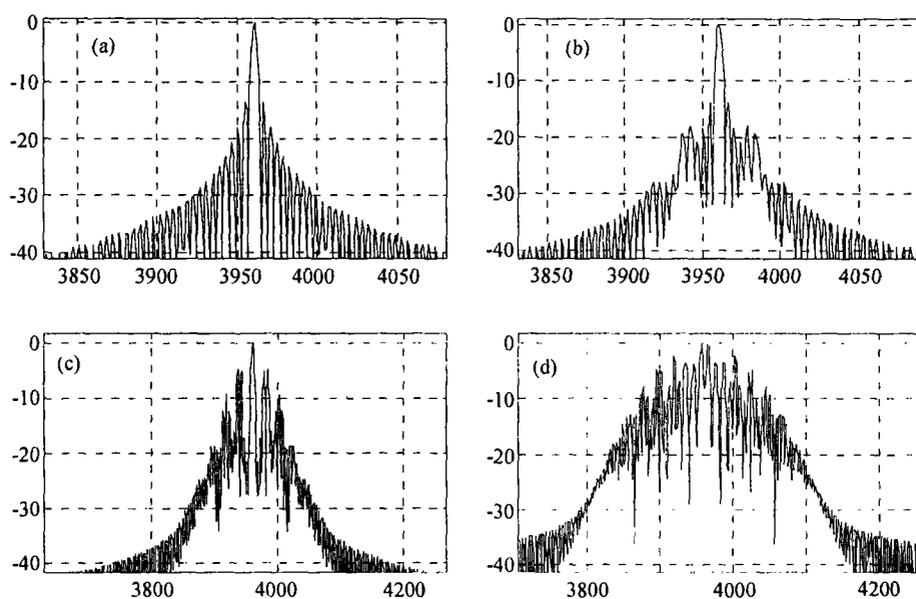


图 1 $|F(t)|_{\max}$ 对脉压结果的影响
 (a) $\eta = 0$, (b) $\eta = 1.1 \times 10^{-14}$, (c) $\eta = 5 \times 10^{-14}$, (d) $\eta = 11 \times 10^{-14}$

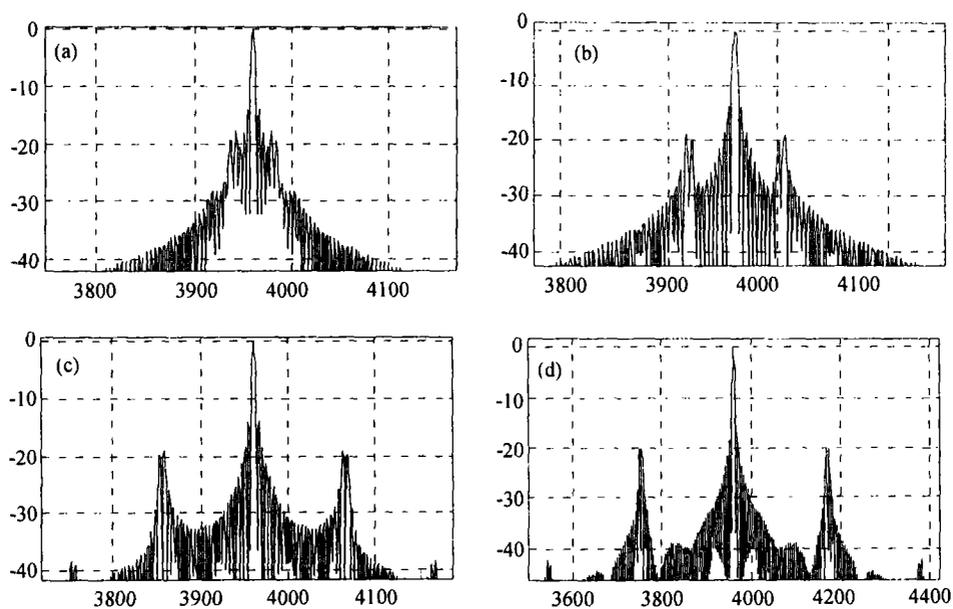


图 2 频率偏移函数不同谐波对脉压结果的影响
 (a) $n=5$, (b) $n=10$, (c) $n=15$, (d) $n=20$

总之, 频率偏移函数的幅度对脉冲压缩结果的影响更大一些。所以, 对于同一 LFM 信号, (5) 式与 (6) 式的定义可以表示其频率线性度的程度。但是, 上述定义有其局限性, 因为经过仿真发现:

(1) 对于相同的 $|F(t)|_{\max}$ 与信号带宽 B , 脉冲宽度 T 不同的两个信号 (两个信号都满足大脉宽带宽), 频率非线性对脉冲宽度大的信号脉压结果影响大。仿真结果见图 3 所示。图中虚线为理想脉冲压缩波形, 实线为 $|F(t)|_{\max} = 0.1$ 条件下脉冲压缩波形。所以, (5) 式和式 (6) 式的定义都是有局限性的。

(2) 对于相同的 $|F(t)|_{\max}$, 随着信号脉冲宽度 T 的增大, $|F(t)|_{\max}$ 对脉压结果的影响越大。仿真结果见图 4 所示。虚线为理想脉冲压缩波形, 实线为 $|F(t)|_{\max} = 0.1$ 条件下脉冲压缩波形。由图可以看出: 尽管两个信号 BT 积相同, $|F(t)|_{\max}$ 相同, 随着信号脉冲宽度 T 的增大, $|F(t)|_{\max}$ 对脉压结果的影响越大。

由上面的分析以及仿真结果我们可以得出, 如果以 (5) 式和 (6) 式定义 LFM 信号的扫频线性度时, 可以表征同一 LFM 信号的频率线性程度, 不同脉宽的 LFM 信号的扫频线性度不具有可比性。

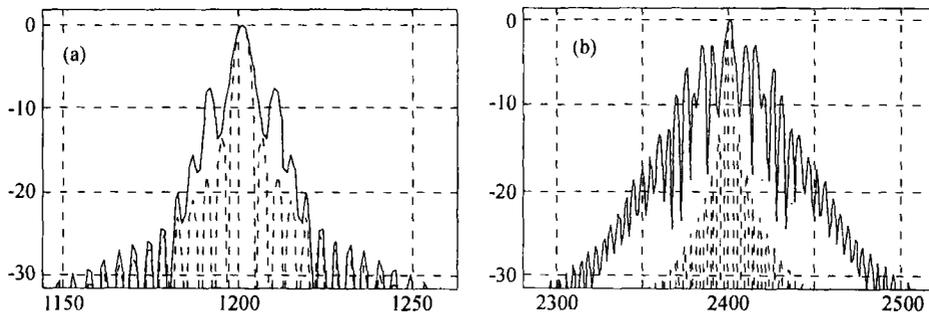


图 3 两种信号脉压结果的比较
(a) $B=30\text{MHz}$, $T=10\mu\text{s}$ (b) $B=30\text{MHz}$, $T=20\mu\text{s}$

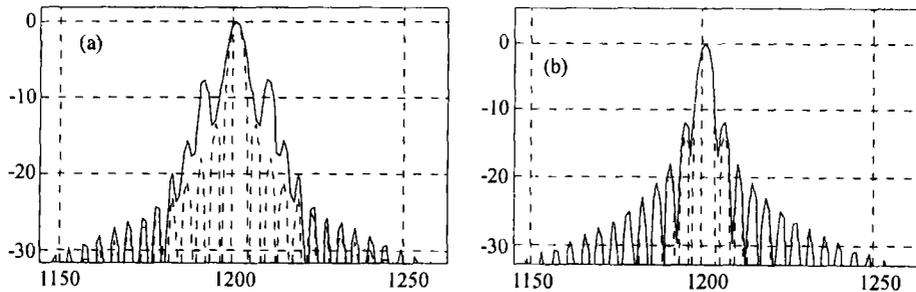


图 4 扫频线性度与信号时宽的关系
(a) $B=30\text{MHz}$, $T=10\mu\text{s}$ (b) $B=60\text{MHz}$, $T=5\mu\text{s}$

3 相位误差

LFM 信号数字产生过程中, 相位误差的来源有: DDS 器件相位舍位、正交调制器的相位

非正交性、有限的 D/A 位数, 频率非线性以及由基带到中频再到射频的调制过程中, 滤波器, 调制器, 放大器的幅频特性不平坦等。关于相位误差对 LFM 信号脉冲压缩结果的影响, 文献 [5,6] 已经做了详细的讨论。下面讨论正交调制器 I, Q 两路相位不平衡时对脉压结果的影响。

目前采用数字方法产生宽带 LFM 信号时, 为了降低基带数据速率, 经常采用正交调制的方法。

若正交调制器 I, Q 两路相位误差为 Φ , 则此时 LFM 信号 $s_1(t)$ 可表示如下:

$$\begin{aligned} s_1(t) &= \cos(k\pi t^2 + \Phi) + i \cdot \sin(k\pi t^2) \\ &= \cos(k\pi t^2) \cos \Phi - \sin(k\pi t^2) \sin \Phi + i \cdot \sin(k\pi t^2) \\ &= \cos(k\pi t^2) + i \cdot \sin(k\pi t^2) - 2 \cos(k\pi t^2) \sin^2(\Phi/2) - \sin(k\pi t^2) \sin \Phi \\ &= s_0(t) - 2 \sin(\Phi/2) \sin(k\pi t^2 - \Phi/2) \end{aligned} \quad (7)$$

上式中第 1 项为理想的 LFM 信号, 第 2 项是由于 I, Q 两路相位不平衡, 给 LFM 信号引入的误差。一般情况下, Φ 的值比较小, 大约为几度, 所以, 上式第 2 项的幅值比较小, 此外, 由上式可以看出: 由于 I, Q 两路相位不平衡, 对 LFM 信号的影响是: 在理想的 LFM 信号的直流分量上叠加一个频率为 $k\pi t^2$ 的正弦起伏, 对 LFM 信号的相位和频谱影响不大, 可以预见: 上式第 2 项对脉压结果的影响不大。仿真结果证实了这一结论。仿真结果如图 5 所示。图中, 曲线 1 为 $\Phi = 14^\circ$ 时的脉压结果, 曲线 2 为理想 LFM 信号的脉压结果。图 5(b) 是图 5(a) 的顶部细化图, 两条曲线基本上重合。由上面的仿真结果可以看出: 正交调制器对脉压结果的影响是积分旁瓣电平升高, 分辨率基本保持不变。

上述分析是假设 I, Q 两路相位误差为一固定值的情况, 随着信号带宽的增大, 相位误差是随时间变化的误差函数, 对脉压结果的影响见文献 [7]。

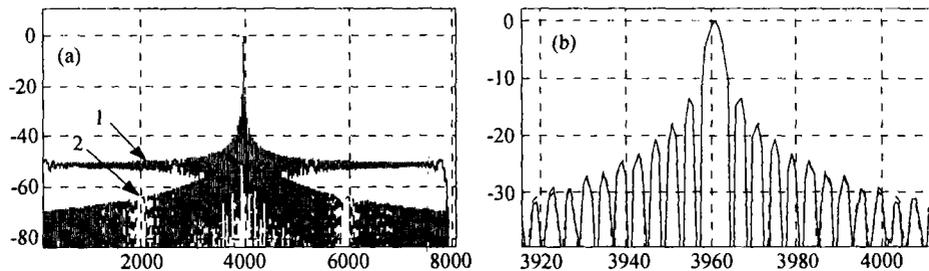


图 5 正交调制器相位不平衡对脉压结果的影响
($B=30\text{MHz}$, $T=33\mu\text{s}$)

4 幅频不平坦

LFM 信号数字产生过程中, 幅频不平坦产生的原因有: 基带 LFM 信号由于调频非线性, 相位误差以及 D/A 位数的有限而产生的幅频不平坦。即使基带 LFM 信号理想, 在由基带到中频再到射频的调制过程中, 还会因为滤波器, 调制器, 放大器的幅频特性不平坦而造成输出 LFM 信号幅频不平坦。LFM 信号的幅频不平坦 (或者称为幅频误差) 不仅会引起脉冲压缩输出的主瓣展宽, 更重要的是会引起第一旁瓣的升高以及整个积分旁瓣的上升。影响 SAR 的距离分辨力以及对弱目标的成像。表 1 给出了 LFM 的参数位 $B=30\text{MHz}$, $T=33\mu\text{s}$ 情况下, 幅频不平坦对脉压输出第一旁瓣的影响。

表 1

幅频误差 (dB)	0(理想情况)	± 0.02	± 0.2	± 0.4	± 0.7	± 1.1	± 1.5	± 1.7
主副比 (未加权, dB)	13.696	13.694	13.654	13.534	13.091	12.442	11.678	10.848
主副比下降 (dB)	0	0.002	0.042	0.162	0.605	1.254	2.014	2.848

5 结 束 语

本文讨论了 LFM 信号频率线性度的定义, 分析了数字 LFM 信号产生过程中, 频率非线性、相位误差、幅频特性不平坦产生的原因以及对 SAR 成像的影响。频率非线性以及幅频误差对脉压结果的影响是近距旁瓣增高, 积分旁瓣上升, 影响 SAR 的距离分辨力、SAR 图像的对比度以及对弱目标的成像; 正交调制器 I,Q 两路相位不平衡时对脉压结果的影响是积分旁瓣的增高, 特别是远端旁瓣, 对 SAR 的影响是影响图像的对比度以及对弱目标的成像, 失去目标的精细结构, 不影响距离分辨率, 仿真结果验证了上述结论。

参 考 文 献

- [1] 汪学刚等, 线性调频信号的线性度校正, 电子学报, 1996, 24(2), 120-122.
- [2] 汪学刚等, 调频线性度与零差拍线性调频连续波雷达的距离分辨力, 系统工程与电子技术, 1997, 19(10), 19-23.
- [3] 宋景唯, 线性度对线性调频雷达距离分辨力的影响, 电子科技大学学报, 1992, 21(2), 121-126.
- [4] 孟宪德等, LFM 信号调频非线性测试技术, 哈尔滨工业大学学报, 1999, 31(4), 66-68.
- [5] 张澄波, 综合孔径雷达—原理、系统分析与应用, 北京, 科学出版社, 1989, 11, 第四章.
- [6] 张群英等, A/D 量化误差对脉冲压缩结果的影响, 现代雷达, 2000, 22(2), 63-68.
- [7] 张群英等, 宽带线性调频信号源设计报告, 电子所内部报告, 2001.

EFFECT OF LFM ERROR ON THE IMAGE OF SAR

Zhang Qunying Yang Xuexian*

(The Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

*(The Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract The definition of frequency linearity of LFM(Linear Frequency Modulation) is discussed in this paper. The causes for frequency linearity, phase error and spectrum unevenness during the process of generation with digital method are analyzed. The effects of these errors on SAR image are also described. Finally, the simulation results are given in this paper.

Key words LFM, Frequency linearity, Spectrum unevenness, Phase error

张群英: 女, 1972 年生, 博士, 研究方向为 SAR 系统技术, 超宽带信号产生以及 SAR 信号处理技术。
 杨学贤: 男, 1970 年生, 博士, 感兴趣的研究方向为数字信号处理的理论与方法。