

LFMCW SAR调频非线性的等效分析方法

侯海平^{1,2}, 曲长文¹, 向迎春¹, 苏峰¹

(1. 海军航空工程学院电子信息工程系 山东 烟台 264001; 2. 91039部队 北京 房山区 102401)

【摘要】针对LFMCW的调频非线性问题,结合LFMCW SAR成像系统特性,分析了非线性频率偏移的影响,讨论了选择不同参考信号进行混频情况下的边带效应,提出了一种将非线性频率误差通过相位误差转化为加性噪声的等效分析方法,并通过仿真分析了该等效噪声对LFMCW SAR距离分辨率的影响。结果表明,较低的线性度对差拍频率和信噪比影响很大。该方法可为基于信号处理消除非线性误差的影响提供新的思路。

关键词 加性噪声; 等效分析; 线性调频连续波; 调频非线性; 相位误差 合成孔径雷达

中图分类号 TN957.5; TN911

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2012.02.005

Equivalent Approach to Analyze the Nonlinearity of LFMCW SAR

HOU Hai-ping^{1,2}, QU Chang-wen¹, XIANG Ying-chun¹, and SU Feng¹

(1. Department of Electronic and Information Engineering, Naval Aeronautical & Astronautical University Yantai Shandong 264001;

2. 91039 Unit Fangshan Beijing 102401)

Abstract The linearity of linear frequency modulated continuous wave synthetic aperture radar (LFMCW SAR) is an important index to measure the linear frequency modulated (LFM) signal and can cause great effect on imaging quality of SAR. Aiming at nonlinearity of LFMCW and combining the characteristic of LFMCW SAR system, nonlinear frequency error is analyzed and sidebands effects of frequency fixing with different reference signal are discussed. An equivalent approach to transform nonlinear frequency error into additive noise by virtue of phase errors is proposed and effect of equivalent noise on LFMCW SAR range resolution is analyzed through simulation. Results demonstrate that lower linearity can cause larger effect on beat frequency and signal-to-noise ratio (SNR). The proposed method can provide new thought for the elimination of nonlinearity influence based on signal processing.

Key words additive noise; equivalent analysis LFMCW; nonlinearity; phase error; SAR

线性调频连续波合成孔径雷达(LFMCW SAR)结合了合成孔径与调频连续波技术,具有体积小、重量轻、分辨率高和结构简单等特点,近年来受到广泛关注^[1]。作为LFMCW SAR发射源,压控振荡器(VCO)的电压-频率特性曲线是非线性的,发射信号与理想调频规律之间存在频率偏移,造成差拍信号频谱展宽,影响距离分辨率。

线性度校正主要有基于硬件处理和信号处理两种途径。前者从对VCO电压校正出发,利用测量结果得到校正电压,采用迭代算法^[2]、瞬时频率测量^[3]等方法,使频率接近理想线性调频,但基于硬件处理方法的精度往往受微处理器字长和D/A采样位数的限制。信号处理方法中,文献[4]提出采用多项式

对系数进行最大似然估计,该方法在多项式阶数较大时计算量大,效率低。文献[5]提出将频率表示为线性项与非线性项的和,使用分段线性拟合的方法估计调频信号的非线性。文献[6]在该方法的基础上研究了存在非线性的FMCW SAR成像算法,但该方法得到的差频信号在非线性项次数较低时,不能反映由高阶项引起的实际频率偏移误差。

LFMCW SAR采用大时宽带宽的线性调频(LFM)信号通过去调频处理得到距离高分辨率,频率线性度、相位误差和幅频特性等参数都会对SAR成像产生影响^[7-8]。对于机载LFMCW SAR系统,由于受尺寸和重量的限制,用复杂的线性化环路获得高线性度的信号也受到限制,因此,需要考虑从信

收稿日期: 2010-07-14; 修回日期: 2011-02-25

基金项目: “泰山学者”建设工程专项基金; 中国博士后科学基金(2005037772)

作者简介: 侯海平(1981-), 男, 博士生, 主要从事高分辨率雷达信息处理和微波遥感等方面的研究。

号处理的角度分析扫频非线性问题^[9]。本文根据 FMCW SAR 特点, 针对闭环校正后的信号, 分析了非线性频率偏移的影响, 讨论了选择不同时延参考信号进行混频情况下的边带效应, 从信号处理的角度给出了一种将非线性频率误差转化为加性高斯白噪声的方法, 并分析了这种等效噪声对距离分辨率的影响。

1 非线性频率偏移模型

实际非理想线性调频信号存在频率误差, 假设瞬时发射频率为:

$$f(t) = f_0 + K_r t + f_c(t) \quad (1)$$

式中, f_0 为载频; $f_c(t)$ 为频率偏差, 且满足边界条件 $f_c(0) = f_c(T_r) = 0$; $K_r = B/T_r$ 为理想线性调频信号的调频斜率; B 为扫频带宽; T_r 为扫频周期。

为了衡量 LFM 信号的性能, 定义线性度用以描述实际的 LFM 信号频率偏离理想线性频率的程度。在采用闭环线性度校正后, 频率偏移函数具有随机性, 服从一定分布。对于任意时间 t , 认为 $f_c(t)$ 服从均值为 0、标准差为 σ 的高斯分布, 即 $f_c(t) \sim N(0, \sigma^2)$, 此时的线性度 L 为均方根线性度^[10], 定义为:

$$L = \left[\frac{1}{T_r} \int_0^{T_r} |f_c(t)|^2 dt \right]^{1/2} / B \quad (2)$$

由于平稳过程的时间平均等于统计平均, 则有:

$$\sigma \approx \left[\frac{1}{T_r} \int_0^{T_r} |f_c(t)|^2 dt \right]^{1/2} \quad (3)$$

可以得到频率偏移函数服从随机分布时的调频线性度为:

$$L = \sigma / B \quad (4)$$

扫频非线性时的发射信号为:

$$s_T(t) = A_1 \exp \left\{ j \left[2\pi \left(f_0 t + \frac{1}{2} K_r t^2 + \int_0^t f_c(\hat{t}) d\hat{t} \right) + \phi_0 \right] \right\} \quad (5)$$

$$t \in [0, T_r]$$

式中, ϕ_0 为初始相位。

时延为 τ_R , 距离为 R 处的目标, 其回波信号可以表示为:

$$s_R(t) = A_2 \exp \left\{ j \left[2\pi \left(f_0(t - \tau_R) + \frac{1}{2} K_r(t - \tau_R)^2 + \int_0^t f_c(\hat{t} - \tau_R) d\hat{t} \right) + \phi_0 \right] \right\} \quad (6)$$

$$t \in [0, T_r]$$

式中, $\tau_R = 2R/c$ 。

将发射信号的时延(时延 $\tau_{\text{ref}} = 2R_{\text{ref}}/c$, R_{ref} 为参考距离)作为参考信号, 与回波信号混频处理后, 得到差频信号为:

$$s(t) = A s_c(t) s_e(t) \quad (7)$$

式中, A 为考虑了空间传播相关的衰减系数和混频处理之后的信号振幅; $s_c(t)$ 是理想线性调频的差频信号, 表示为:

$$s_c(t) = \exp \left[-j2\pi \left(f_0(\tau_R - \tau_{\text{ref}}) - \frac{1}{2} K_r(\tau_R^2 - \tau_{\text{ref}}^2) + K_r(\tau_R - \tau_{\text{ref}})t \right) \right] \quad (7)$$

$$t \in [\tau_R, T_r]$$

其中, $s_e(t)$ 是 $f_c(t)$ 带来的附加项, 可以表示为:

$$s_e(t) = \exp \left[-j2\pi \left(\int_0^t (f_c(\hat{t} - \tau_{\text{ref}}) - f_c(\hat{t} - \tau_R)) d\hat{t} \right) \right] \quad (7)$$

$$t \in [\tau_R, T_r]$$

由式(7)可以看出, $s(t)$ 为 $s_c(t)$ 与 $s_e(t)$ 的时域乘积, 频域中为二者的卷积。由于 $s_e(t)$ 的频谱一般情况下不是单一谱线, 所以 $s_c(t)$ 谱与 $s_e(t)$ 谱卷积的结果使得 $s(t)$ 谱较 $s_c(t)$ 谱明显变宽。此时会导致距离向上的分辨率降低, 旁瓣电平抬高, 峰值旁瓣比和积分旁瓣比变差等^[10]。

在 LFM CW 雷达系统中, 一个周期内的频率偏移 $f_c(t)$ 总是连续可微的, 对于 LFM CW SAR 来说, 成像场景往往在几百米至几千米, 回波信号的延迟时间为微秒级, 因此可以认为 $\tau_R \ll T_r$ 。因此, 有:

$$s_e(t) = \exp \left[-j2\pi \left(\int_0^t (f_c(\hat{t} - \tau_{\text{ref}}) - f_c(\hat{t} - \tau_R)) d\hat{t} \right) \right] = \exp \left[-j2\pi \left(\int_0^t \frac{df_c(\hat{t})}{d\hat{t}} (\tau_R - \tau_{\text{ref}}) d\hat{t} \right) \right] = \exp[-j2\pi(\tau_R - \tau_{\text{ref}})f_c(t)] \quad (8)$$

$$t \in [\tau_R, T_r]$$

由式(8)可见, 当选择场景回波作为参考信号后, 误差信号与 $|\tau_R - \tau_{\text{ref}}|$ 有关, 相比于选择发射信号作为参考信号来说, 误差信号的量值要小得多。

2 非线性频率偏移特性

将 $s_e(t)$ 作泰勒展开有:

$$s_e(t) = 1 - j2\pi(\tau_R - \tau_{\text{ref}})f_c(t) - \frac{4\pi^2(\tau_R - \tau_{\text{ref}})^2}{2!} f_c^2(t) + \dots + \frac{[-j2\pi(\tau_R - \tau_{\text{ref}})]^n}{n!} f_c^n(t) + \dots \quad (9)$$

将式(9)代入式(7)中求得 $s(t)$ 的自相关函数为:

$$\begin{aligned}
R_s(\tau) &= E[s(t)s^*(t-\tau)] = \\
&A^2 \exp[-j2\pi K_r(\tau_R - \tau_{\text{ref}})\tau] + \\
&\left[4\pi^2(\tau_R - \tau_{\text{ref}})^2\right] A^2 \exp[-j2\pi K_r(\tau_R - \tau_{\text{ref}})\tau] \times \\
&R_{f_c}(\tau) + \left[\frac{4\pi^2(\tau_R - \tau_{\text{ref}})^2}{2!}\right]^2 A^2 \exp \times \\
&[-j2\pi K_r(\tau_R - \tau_{\text{ref}})\tau] R_{f_c^2}(\tau) + \dots \quad (10)
\end{aligned}$$

根据Wiener-Khinchin公式,有:

$$\begin{aligned}
S_s(f) &= A^2 \delta[f + K_r(\tau_R - \tau_{\text{ref}})] + \\
&\left[4\pi^2(\tau_R - \tau_{\text{ref}})^2\right] A^2 \delta[f + K_r(\tau_R - \tau_{\text{ref}})] \otimes S_{f_c}(f) + \\
&\left[4\pi^4(\tau_R - \tau_{\text{ref}})^4\right] A^2 \delta[f + K_r(\tau_R - \tau_{\text{ref}})] \otimes S_{f_c^2}(f) + \dots \quad (11)
\end{aligned}$$

式中, \otimes 表示卷积; $S_{f_c}(f)$ 表示 $f_c(t)$ 的功率谱密度; $S_{f_c^2}(f)$ 表示 $f_c^2(t)$ 的功率谱密度。

式(11)反映了存在非线性频率偏移时,非线性边带在目标谱附近引起附加的调制边带^[11]。当选择的参考信号为发射信号,即 $\tau_{\text{ref}} = 0$ 时,仅与目标距离有关。目标距离越远,则 τ_R 越大,非线性边带越高;随着 τ_R 的增加,非线性边带会大于目标回波谱,导致系统无法工作。当选择的参考信号为发射信号的延迟时,非线性边带与目标和参考距离差对应的时延差值 $|\tau_R - \tau_{\text{ref}}|$ 有关,对于LFMCW SAR来说,选择发射信号的延迟作为参考信号会减小非线性边带的影响。当 $\tau_R = \tau_{\text{ref}}$, 根据式(11),可以消除非线性边带的影响。

从信号相关性角度解释,回波信号与发射信号的延迟混频,线性度对脉冲压缩的影响小于直接与发射信号去调频的情况,这是因为在同源去调频情况下,发射延迟信号与回波信号的频率偏移函数的相关性大于发射信号与回波信号之间的频率偏移函数的相关性,该相关性在一定程度上抑制了频率偏移函数对脉冲压缩的影响,并且 $|\tau_R - \tau_{\text{ref}}|$ 越小,相关性越强,抑制程度越好,当目标回波时延 $\tau_R = \tau_{\text{ref}}$ 时,非线性对差拍信号的影响消除。LFMCW信号的非线性问题使同一目标的回波能量大范围扩散,直接造成距离分辨率下降,而且信号回波与参考距离回波时延差值越大,非线性误差对成像影响越突出^[12]。因此,在LFMCW SAR成像处理中,当采用发射信号的延迟信号(延迟时间通常为条带中心斜距对应的回波时延)作为去调频混频信号时,有几个方面的优势:1)可以改善距离维分辨率;2)可以减小处理系统A/D变换器的采样率和采用FFT算法的运算量,降低硬件成本及程序复杂度;3)可以改善

存在调频非线性误差时非边带的影响。

3 调频非线性误差的等效处理

令 $f_{\text{equ}}(t) = (\tau_R - \tau_{\text{ref}})f_c(t)$, 将频率偏移误差函数转换为误差函数 $f_{\text{equ}}(t)$, 由于 $f_c(t) \sim N(0, \sigma^2)$, 则 $f_{\text{equ}}(t) \sim N(0, (\tau_R - \tau_{\text{ref}})^2 \sigma^2)$, 差频信号可以表示为:

$$s(t) = A \exp[j(\phi(t) + v(t))] \quad (12)$$

式中, $\phi(t) = -2\pi \times \left(f_0(\tau_R - \tau_{\text{ref}}) - \frac{1}{2} K_r(\tau_R^2 - \tau_{\text{ref}}^2) + K_r(\tau_R - \tau_{\text{ref}})t \right)$; $v(t) = -2\pi f_{\text{equ}}(t)$; $v(t) \sim N(0, 4\pi^2 \times (\tau_R - \tau_{\text{ref}})^2 \sigma^2)$ 。

没有相位噪声的理想信号为:

$$x(t) = A \exp[j(\phi(t))] \quad (13)$$

由于解析信号的实部和虚部是正交的,利用希尔伯特变换可以构造解析信号,由 $u(t)$ 及其希尔伯特变换 $v(t)$ 构成的解析信号为:

$$w(t) = u(t) + jv(t) \quad (14)$$

由于 $\sigma_w^2 = 2\sigma_v^2$, 则 $w(t) \sim N(0, 8\pi^2(\tau_R - \tau_{\text{ref}})^2 \times \sigma^2)$, 且:

$$1 + w(t) = \sqrt{[1 + u(t)]^2 + v^2(t)} \exp[j\phi(t)] \quad (15)$$

式中, $\phi(t) = \tan^{-1}\left(\frac{v(t)}{1 + u(t)}\right)$ 。

令 $y(t) = Aw(t) \exp[j\phi(t)]$, 则 $y(t)$ 为复高斯白噪声信号,其方差为:

$$\sigma_y^2 = A^2 \sigma_w^2 = 8A^2 \pi^2 (\tau_R - \tau_{\text{ref}})^2 \sigma^2 \quad (16)$$

假设理想信号 $x(t)$ 中含有高斯噪声 $y(t)$ 时的信噪比为SNR,当SNR较大时,根据文献[13],式(15)可近似为:

$$1 + w(t) \approx \exp[j \tan^{-1}(v(t))] \approx \exp[jv(t)] \quad (17)$$

对于机载LFMCW SAR平台,场景回波信号的延时时 τ_R 在 10^{-6} s, 满足上述条件。根据式(13)、式(15)和式(17),式(12)可以表示为:

$$s(t) = x(t) + y(t) \quad t \in [\tau_R, T_r] \quad (18)$$

由分析可知,根据非线性频移特性,上述变换将调频非线性误差处理为相位噪声,并转换成等效的加性噪声,高斯白噪声 $y(t)$ 的方差随目标和参考距离差 $(\tau_R - \tau_{\text{ref}})$ 变化。

经过上述等效处理,将调频非线性误差转换为相位误差。在实际的SAR系统中,除了频率非线性,正交调制器的相位非正交性等也是引入相位误差的原因,这些误差叠加在一起,最终引起SAR图像几何失真、分辨率下降以及出现虚假目标等。由于

LFMCW SAR系统对回波信号采用去调频处理, 相比脉冲压缩处理, 对线性度的要求更高^[8], 扫频线性度对LFMCW SAR成像的距离分辨率有决定性影响^[6,12]。因此, 本文仅考虑调频非线性引入的相位误差, 并重点分析其与距离分辨率之间的关系。

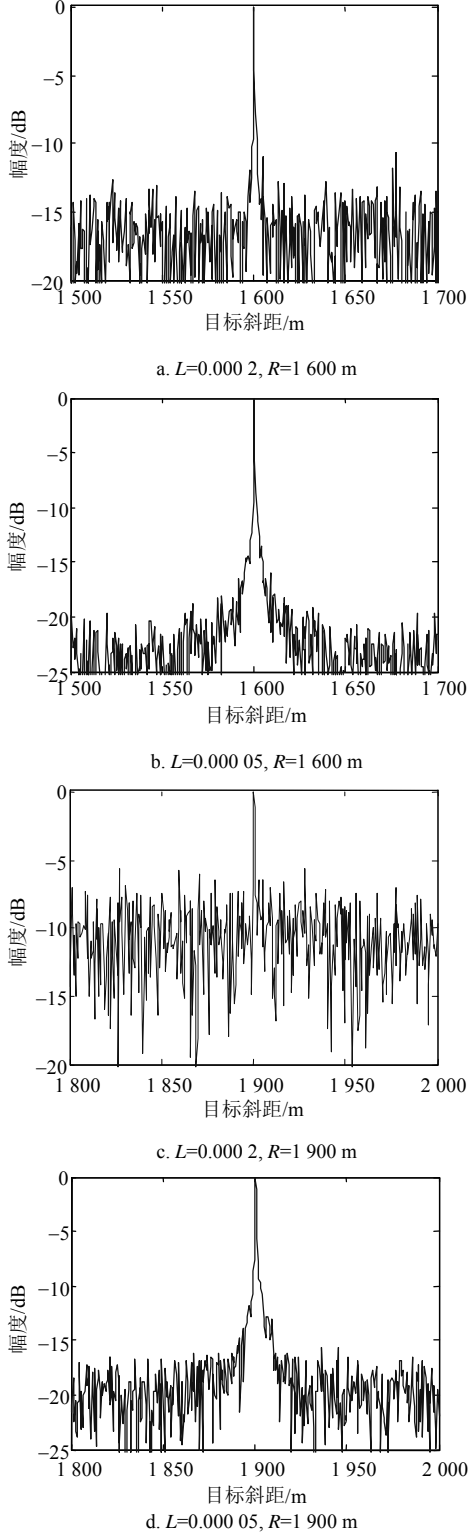


图1 线性度对点目标距离像的影响

图1给出了线性度分别为0.000 2和0.000 05时,

差频信号进行傅里叶变换后点目标回波的距离像。中心频率为35 GHz, 扫频带宽为300 MHz, 扫频周期为1 ms。为了比较通过等效处理后, 调频非线性对不同目标点距离像的影响, 选取数据录取平面内点目标与雷达平台的斜距 R 分别为1 600 m和1 900 m处两个点目标, 参考距离 R_{ref} 选择1 200 m的场景中心。由图中可见, 点目标与参考距离越远, 即 $|\tau_R - \tau_{\text{ref}}|$ 越大, 则目标的回波能量扩散越严重, 造成距离分辨率下降。此外, 线性度对距离分辨率影响很大, 10^{-4} 的线性度已不能满足LFMCW SAR成像分辨率对线性度的要求, 这与其他方法的分析结论是一致的。为了实现高分辨的要求需要进一步提高线性度。

4 等效噪声对LFMCW SAR距离分辨率的影响

实际雷达回波总是有噪声的, 包括来自空间的杂波和系统内部噪声等。这里仅讨论非线性频移通过等效处理后的加性噪声 $y(t)$ 。

将式(18)表示为:

$$s(t) = [x(t) + y(t)]G(t) \quad (19)$$

式中, $G(t)$ 为长度为 T_r 的矩形窗。

设理想线性调频信号 $x(t)$ 的自相关函数为 $R_x(\tau)$, 噪声 $y(t)$ 的自相关函数为 $R_y(\tau)$ 。假定 $x(t)$ 、 $y(t)$ 和 $G(t)$ 是相互独立的, 并且有 $E[y(t)] = 0$, 因此, 有:

$$R_s(\tau) = [R_x(\tau) + R_y(\tau)]R_G(\tau) \quad (20)$$

根据Wiener-Khinchin定理, 有:

$$SS_s(f) = SS_x(f) + SS_y(f) \quad (21)$$

式中, $SS_x(f) = S_x(f) \otimes S_G(f)$; $SS_y(f) = S_y(f) \otimes S_G(f)$; $S_x(f) = A^2 \delta[f + K_r(\tau_R - \tau_{\text{ref}})]$; $S_G(f) = T_r^2 \sin^2(fT_r)$; $S_y(f) = \sigma_y^2$ 。

由Parseval定理可知, 理想信号 $x(t)$ 的能量为:

$$E_x = \int_{-\infty}^{\infty} SS_x(f) df = A^2 T_r \quad (22)$$

对于理想信号, 峰值处 $f_{\text{peak}} = -K_r(\tau_R - \tau_{\text{ref}})$ 的功率谱密度为:

$$SS_x(f_{\text{peak}}) = A^2 T_r^2 = E_x T_r \quad (23)$$

对于噪声, 有:

$$SS_y(f) = \sigma_y^2 T_r \quad (24)$$

则相位误差等效加性噪声处理后的SNR为:

$$\text{SNR} = \frac{E_x}{\sigma_y^2} \quad (25)$$

通过闭环校正后, 线性度 L 可以达到 10^{-4} 的量

级,而对LFMCW SAR而言,由于采用的带宽可达到500 MHz,仅仅通过闭环校正达到的线性度是不够的^[14]。当 L 数量级在 10^{-6} 时,扫频非线性对距离向处理性能的影响才可以忽略^[9]。图2给出了SNR随 L 的变化曲线。可见, L 对等效SNR的影响较大,随着线性度的升高,信噪比逐渐增大,在 10^{-6} 时,SNR值较大,可以达到所需要的信噪比水平。

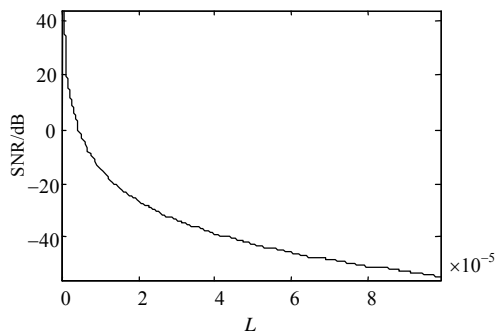


图2 SNR随线性度变化曲线

由式(23)、式(24)和式(25)可得:

$$SS_y(f) = \frac{SS_x(f_{\text{peak}})}{\text{SNR}} \quad (26)$$

将式(26)代入式(21)可得:

$$SS_s(f) = SS_x(f) + \frac{SS_x(f_{\text{peak}})}{\text{SNR}} \quad (27)$$

对含有噪声时的功率谱进行归一化处理^[15]有:

$$\frac{SS_s(f)}{SS_s(f_{\text{peak}})} = \frac{SS_x(f) + \frac{SS_x(f_{\text{peak}})}{\text{SNR}}}{SS_x(f_{\text{peak}}) \left(1 + \frac{1}{\text{SNR}}\right)} = \frac{\frac{SS_x(f)}{SS_x(f_{\text{peak}})} \text{SNR} + \frac{1}{1 + \text{SNR}}}{1 + \text{SNR}} \quad (28)$$

SAR分辨率定义为3 dB处的主瓣宽度,进行归一化处理后,对应-3 dB处的主瓣宽度,当为无噪声的理想信号时, $\frac{SS_s(f)}{SS_s(f_{\text{peak}})} = 0.3$ 为理想的主瓣宽

度,考虑加性噪声后,主瓣宽度随SNR的变化如图3所示。

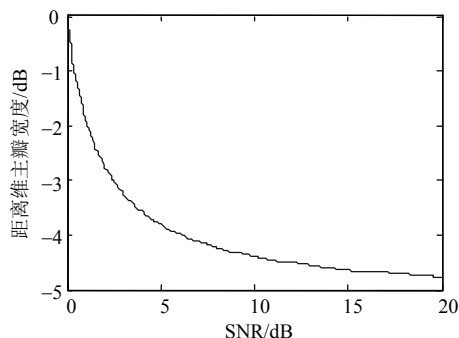


图3 白噪声背景下距离像主瓣宽度随SNR的变化

仿真结果表明,随着信噪比的提高,主瓣宽度

逐渐减小,并接近于理论值。当 $\text{SNR} = 2.48 \text{ dB}$,加性噪声情况下的主瓣宽度可以达到-3 dB。综合图2和图3仿真结果可知,通过提高线性度来增大信噪比可以在较小的信噪比条件下达到较高的分辨率要求。通过以上分析,为了减小调频非线性对距离维成像的影响,在进一步的处理中可以考虑采用去噪的方法消除等效的高斯白噪声。

5 结束语

随着对LFMCW SAR分辨率要求的提高,对于LFMCW信号的线性度也有了更严格的要求。本文在考虑了闭环校正后调频非线性频率按随机分布的条件下,分析了非线性频移特性,提出了一种通过信号处理的方法,将相位噪声等效处理为加性高斯白噪声的形式,并讨论了该等效噪声对LFMCW SAR距离分辨率的影响。由于提高线性度在物理实现上的难度较大,本文的研究方法可为基于信号处理减小调频非线性对距离像的影响提供有益的参考。

参考文献

- [1] WANG Wen-qin, PENG Qi-cong, CAI Jing-ye. Waveform-diversity-based millimeter-wave UAV SAR remote sensing[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47(3): 691-700.
- [2] 汪学刚, 向敬成, 冯建雄, 等. 用迭代方法精确实现FMCW信号的线性调频[J]. 系统工程与电子技术, 1997, 19(7): 23-26.
WANG Xue-gang, XIANG Jing-cheng, FENG Jian-xiong, et al. An iterative algorithm of sweep linearity correction for FMCW signals[J]. Systems Engineering and Electronics, 1997, 19(7): 23-26.
- [3] 汪学刚, 冯建雄, 向敬成. 线性调频信号的线性度校正[J]. 电子学报, 1996, 24(10): 120-122.
WANG Xue-gang, FENG Jian-xiong, XIANG Jing-cheng. Linearity correction for linear FM sweep signals[J]. Acta Electronica Sinica, 1996, 24(10): 120-122.
- [4] KULPA K S, WOJTKIEWICZ A, NALECZ M, et al. The simple analysis method of nonlinear frequency distortions in FMCW radar[J]. Journal of Telecommunications and Information Technology, 2001, 4: 26-29.
- [5] AHMED N. Hardware and software techniques to linearize the frequency sweep of FMCW radar for range resolution improvement[M]. Kansas: University of Kansas, 2007.
- [6] 曲长文, 王颖, 苏峰, 等. LFMCW SAR非线性校正成像方法研究[J]. 中国电子科学研究院学报, 2009, 4(1): 50-53.
QU Chang-wen, WANG Ying, SU Feng, et al. Research on nonlinearity correction imaging method of LFMCW SAR[J]. Journal of CAEIT, 2009, 4(1): 50-53.

(下转第237页)

- [7] SAMBO N, PINART C, LE R E, et al. Signaling and multi-layer probe-based schemes for guaranteeing QoT in GMPLS transparent networks[C]//2009 Conference on Optical Fiber Communication-Includes Post Deadline Papers. San Diego, CA, USA: [s.n.], 2009.
- [8] IETF RFC3717. IP over optical networks: a framework[S]. 2004.
- [9] CUI Xin-you, WANG Jing, YAO Xiang-yu. Optimization of multilayer restoration and routing in IP-over-WDM networks[C]//Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference. San Diego, CA, USA: [s.n.], 2008.
- [10] RATNAM K, ZHOU Lu-ying, GURUSAMY M. Efficient multi-layer operational strategies for survivable IP-over-WDM networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2006, 24(8): 16-31.
- [11] 赵继军, 纪越峰, 徐大雄. IP/GMPLS/Optical多层网络生存性机制的协调[J]. 光子学报, 2003, 32(7): 803-806.
ZHAO Ji-jun, JI Yue-feng, XU Da-xiong. Coordinated survivability strategies for IP/GMPLS/optical multi-layer network[J]. Acta Photonica Sinica, 2003, 32(7): 803-806.
- [12] TAPOLCAI J, HO P P, VERCHERE D, et al. A new shared segment protection method for survivable networks with guaranteed recovery time[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2008, 57(2): 272-282.

编辑 黄 莘

(上接第202页)

- [7] 张群英, 杨学贤. LFM信号误差对SAR成像的影响分析[J]. 电子与信息学报, 2003, 25(2): 229-234.
ZHANG Qun-ying, YANG Xue-xian. Effect of LFM error on the image of SAR[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2003, 25(2): 229-234.
- [8] 陆必应, 梁甸农. 调频线性度对线性调频信号性能影响分析[J]. 系统工程与电子技术, 2005, 27(8): 1834-1836.
LU Bi-ying, LIANG Dian-nong. Effects of FM linearity on the performance of LFM signals[J]. Systems Engineering and Electronics, 2005, 27(8): 1834-1836.
- [9] 江志红. 调频连续波SAR实时成像算法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2008.
JIANG Zhi-hong. Study on real-time imaging algorithm of FMCW SAR[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008.
- [10] 李保国, 王远模, 赵宏钟, 等. 调频线性度对chirp信号的距离分辨力影响仿真分析[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(4): 986-989.
LI Bao-guo, WANG Yuan-mo, ZHAO Hong-zhong, et al. Simulation and analysis of FM linearity effect on range resolution of chirp signal[J]. Journal of System Simulation, 2005, 17(4): 986-989.
- [11] WANG Dong-jin, HU Xiang, RUAN Wen-jie. Analysis of the influence of the FM non-linearity on the range resolution of LFMCW radar[C]//Asia Pacific Microwave Conference. [S.l.]: [s.n.], 1999: 714-717.
- [12] 董勇伟, 梁兴东, 丁赤飏. 调频连续波SAR非线性处理方法研究[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(5): 1034-1039.
DONG Yong-wei, LIANG Dong-xing, DING Chi-biao. Non-linear signal processing for FMCW SAR[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2010, 32(5): 1034-1039.
- [13] TRETTER S A. Estimating the frequency of a noisy sinusoid by linear regression[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1985, IT-31(6): 832-835.
- [14] 纪慧波, 王一丁, 洪峻, 等. 合成孔径雷达线性调频信号的线性度约束研究[J]. 测试技术学报, 2003, 17(3): 247-250.
JI Hui-bo, WANG Yi-ding, HONG Jun, et al. Research on the linearity requirement of LFM in SAR[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2003, 17(3): 247-250.
- [15] 陈祝明, 丁义元, 向敬成. 线性调频连续波雷达的噪声性能分析[J]. 电子科技大学学报, 1999, 28(1): 28-31.
CHEN Zhu-ming, DING Yi-yuan, XIANG Jing-cheng. Analysis on antinoise property of LFMCW radar[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 1999, 28(1): 28-31.

编辑 税 红