

## 时钟抖动对中频线性调频采样及脉冲压缩影响的研究

陈佳民<sup>①②</sup> 童智勇<sup>①</sup> 杨汝良<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

<sup>②</sup>(中国科学院研究生院 北京 100039)

**摘要:** 时钟抖动是模数转换过程中影响信号信噪比的最主要因素之一。该文从时域连续信号角度出发,按照高斯随机过程模型,分析了时钟抖动对基带和中频线性调频信号信噪比的影响并给出了近似公式。结合量化噪声的影响,可定量计算影响信噪比各因素之间的关系。仿真结果表明适用于模数转换后所得离散数字信号信噪比计算。合成孔径雷达经过脉冲压缩得到图像,为了抑制旁瓣需要使用窗函数加权,分析了时钟抖动在加窗前后对脉冲压缩时峰值旁瓣比和积分旁瓣比的影响。最后讨论了一些减小时钟抖动的具体措施。

**关键词:** 合成孔径雷达; 时钟抖动; 线性调频信号; 中频采样; 信噪比; 脉冲压缩

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)07-1686-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.00926

## Research for the Effect on Intermediate Frequency Sampling and Pulse Compression Due to Clock Jitter

Chen Jia-min<sup>①②</sup> Tong Zhi-yong<sup>①</sup> Yang Ru-liang<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

<sup>②</sup>(Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** Clock jitter is one of the most importation factors that affects the Signal-to-Noise Rate(SNR). Based on Gaussian random process model and continuous-time system in time domain ,this paper analyzes the effect on baseband and intermediate frequency sampling due to clock jitter. Taking into account the quantization noise, an approximate formula of the relationship between SNR and other factors is obtained in time domain. The simulation results show that the formula also be applicable to calculate the SNR in discrete-time system. The paper also discusses the influence of clock jitter on the pulse compression of the Synthetic Aperture Radar(SAR) signal. The window function is used to weight the signal in order to suppress the side lobe in pulse compression process. Finally, several methods to reduce the clock jitter are introduced.

**Key words:** SAR; Clock jitter; Linear frequency modulation; Intermediate Frequency(IF) sampling; Signal to Noise Rate(SNR); Pulse compression

### 1 引言

合成孔径雷达(SAR)发展方向之一是获取高分辨率图像,因此雷达信号带宽不断增加,目前先进的高分辨合成孔径雷达信号已达到几百兆甚至千兆级的模拟带宽<sup>[1-3]</sup>。根据 Nyquist 采样和带通采样理论,雷达接收机的模数转换速率应为信号最高频率分量或带宽的 2 倍以上,这就要求雷达接收机具有极高的模数转换速率。这些因素导致模数转换结果对采样时钟抖动更加敏感,对信号信噪比的影响更加严重。随着电子技术飞速发展,具有良好性能指标和灵活功能配置的数字接收机应用越来越广

泛,所能处理的信号频率和带宽不断增加。线性调频信号是合成孔径等雷达系统最常用的信号之一,在系统设计和工程实现时需要确定各分机、器件的性能指标参数,因此定量分析时钟抖动对基带和中频线性调频信号信噪比,以及对合成孔径雷达成像时脉冲压缩性能的影响是有必要的。

### 2 时钟抖动对模数转换的影响

模数转换过程与混频的过程十分相似。模拟信号相当于混频器的输入,采样时钟相当于本振,如果采样时钟含有较大噪声,表现为在理想采样上升沿跳变时刻发生前后偏移,即时钟抖动现象,这样采样获得的数字信号就会偏移理想值。

图 1 给出了采样时钟抖动造成的采样信号失真的示例。 $t_0$  为正确采样时刻,  $t_1$  为发生抖动  $t_j$  时间

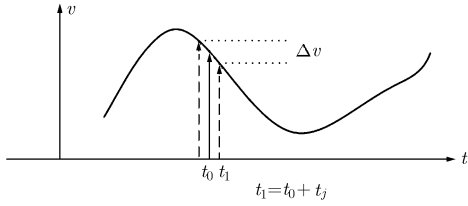


图 1 采样时钟抖动噪声造成的信号失真

后的实际采样时刻，可以看出这种随机抖动会引起信号幅度发生  $\Delta v$  的失真，且信号变化率越快即信号高频分量越高，失真越严重。

采样时钟噪声有时域和频域两种不同的描述方式。时域上通常称为“抖动”，而频域上则称为“相位噪声”。时钟抖动实质上是 A/D 采样时刻的不确定性，即时钟上升沿翻转电平出现时刻的不确定性，从这个角度上来讲，时钟抖动和 ADC 内部采样保持电路孔径抖动来源不同，但对系统信噪比的影响是一致的，因此对时钟抖动和孔径抖动对采样结果影响的分析过程和结论是相同的，后者均方根值比较固定，可由 ADC 器件手册查得。一般的时钟抖动  $t_j$  由定量抖动  $d_j$  和随机抖动  $r_j$  两个部分构成<sup>[4]</sup>，如式(1)所示。

$$t_j^2 = d_j^2 + r_j^2 \quad (1)$$

$d_j$  和  $r_j$  的发生原因有很多，最主要是电路串扰、EMI 电磁辐射、电源噪声，或传输线不匹配引起的驻波及振铃效应，热噪声、散粒噪声及闪烁噪声等等。 $d_j$  一般表示非高斯的分布方式，变化范围较小，可以用峰峰值的界限数值来加以定量化，它不会随着采样次数的增加而增加，对信噪比的影响比较确定且较小。 $r_j$  随机抖动变化范围比较大，对采样信噪比影响比较大，通常可以通过测量其均方根数值来定量表征。

### 2.1 时钟抖动对正弦信号采样的影响

文献[5-8]研究了抖动积累，晶振噪声等情况下输入单音正弦信号时孔径抖动和时钟抖动对 A/D 转换的影响并给出了信噪比计算公式，可计算出符

合所需采样信号信噪比条件下对时钟抖动的要求。

若输入模数转换器的单音正弦信号为： $r(t) = A \cos(2\pi f_c t)$ ，一般的时钟抖动  $t_j$  服从零均值高斯分布  $(0, \sigma_j^2)$ ，当  $t_j$  较小时，则由时钟抖动引起的噪声信号和噪声功率分别为

$$n_j(t) = t_j \frac{dr(t)}{dt} = -2k\pi t_j \sin(k\pi t^2) \quad (2)$$

$$P_j = E \left[ \frac{1}{T} \int_0^T n_j^2(t) dt \right] = \frac{4A^2\pi^2 f^2}{T} E(t_j^2) \int_0^T \sin^2(2\pi f t) dt$$

$$= \frac{2A^2\pi^2 f^2}{T} E(t_j^2) \int_0^T [1 - \sin(4\pi f t)] dt = 2A^2\pi^2 f^2 \sigma_j^2 \quad (3)$$

$T$  为采样时间长度，一般是信号周期的几百上千倍以上，因此式中  $\int_0^T \sin(4\pi f t) dt$  项积分数值很小，可忽略不计。不考虑量化误差和热噪声等其他干扰情况下信噪比为

$$\text{SNR}_J = 10 \lg \left( \frac{P_s}{P_j} \right) = 10 \lg \left( \frac{A^2/2}{2A^2\pi^2 f^2 \sigma_j^2} \right)$$

$$= -20 \lg(2\pi f \sigma_j) \quad (4)$$

量化噪声功率为  $\sigma_q^2 = \frac{1}{12} \left( \frac{2A}{2^N} \right)^2$ <sup>[9]</sup>，考虑量化噪声情况下信噪比为(其中  $N$  为 ADC 转换位数)

$$\text{SNR}_{JQ} = 10 \lg \left( \frac{P_s}{P_j + P_q} \right) = -10 \lg \left( 4\pi^2 f^2 \sigma_j^2 + \frac{2}{3 \cdot 4^N} \right)$$

$$= 10 \lg \left[ \frac{3 \cdot 4^N}{12(2^N \pi f \sigma_j)^2 + 2} \right] \quad (5)$$

图 2 为时钟抖动均方根  $\sigma_j$  与采样信号信噪比 (SNR) 以及有效位数 (ENOB) 之间关系图。图 2(a) 为不考虑量化噪声情况，图 2(b) 为含 8 bit 采样量化噪声情况。信号信噪比、有效位数与时钟抖动均方根  $\sigma_j$  和信号频率  $f$  成反比，与采样频率大小无关。

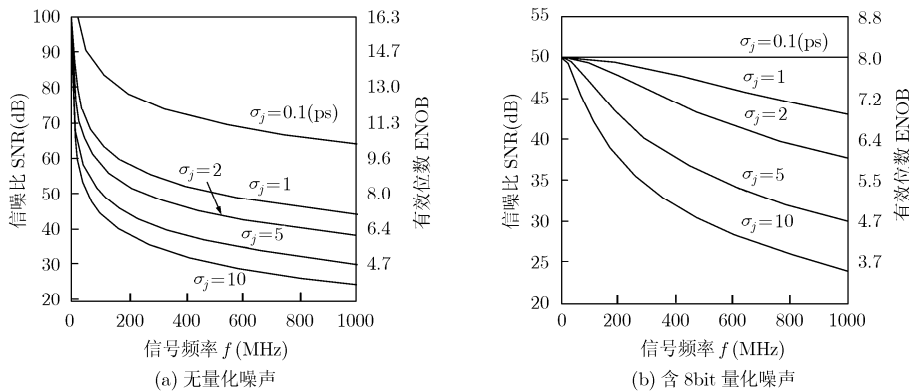


图 2 时钟抖动均方根值与采样信噪比关系

当 $\sigma_j$ 较小时,信噪比由量化噪声确定,当时钟抖动导致的噪声接近和大于量化噪声后,信噪比主要由时钟抖动来决定。根据式(5)给出的信噪比、输入信号频率、时钟抖动均方根、有效位数等参数之间的关系,可由已知参数计算出未知量来指导实际电路设计。式中未考虑热噪声、非线性失真等较小较稳定的噪声,因此计算所得参数要留有一定余量。

## 2.2 时钟抖动对基带线性调频信号采样的影响

文献[10]从频域给出了时钟抖动对信号信噪比的影响计算通式,文献[11,12]分析了可分解为若干正弦信号的宽带信号信噪比计算方法,这些结论具有通用性,但不够直观简便。文献[13]研究了时钟抖动对基带线性调频信号信噪比的影响,本文在仿真验证前叙文献所做工作基础上,从时域波形研究了量化噪声和时钟抖动作用下对基带线性调频信号的影响,以及对中频奈奎斯特采样和带通采样条件下线性调频信号信噪比的影响。

线性调频是现代雷达最常用的调制波形之一,目前大部分合成孔径雷达都使用线性调频信号作为工作波形。由前面单频信号分析可知,接收到的射频回波信号在基带或中频甚至射频直接数字化过程中,模拟信号频率越高,时钟抖动对信噪比的影响也越大。下面定量分析在不同采样模式下时钟抖动对线性调频信号信噪比的影响。一般的基带线性调频信号同相分量表达式为

$$r_I(t) = A \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) \cos(\pi k t^2) \quad (6)$$

其中 $\text{rect}(t/T)$ 为矩形函数, $T$ 为信号脉冲时间宽度, $k$ 为线性调频斜率,即: $k = B/T$ , $B$ 为线性调频信号带宽。当采样时间 $t$ 存在高斯分布 $(0, \sigma_j^2)$ 抖动时,变为随机变量 $t_j$ ,当 $t_j$ 较小时,则由抖动产生的噪声和噪声功率为

$$n_I(t) = t_j \frac{dr_I(t)}{dt} = -2\pi k A \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) t_j t \sin(\pi k t^2) \quad (7)$$

$$\begin{aligned} P_J &= E\left[\frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} n^2(t) dt\right] \\ &= \frac{(2\pi k A)^2}{T} E\left[t_j^2 \int_{-T/2}^{T/2} t^2 \sin^2(\pi k t^2) dt\right] \\ &= \frac{2(\pi k A)^2 \sigma_j^2}{T} \left[ \int_{-T/2}^{T/2} t^2 dt - \int_{-T/2}^{T/2} t^2 \cos(2\pi k t^2) dt \right] \quad (8) \end{aligned}$$

一般常用雷达系统脉冲宽度约为几十微秒量级,信号带宽为数十至几百兆赫兹数量级,因此式

中第2项积分自变量 $2\pi k t^2$ 变化范围约为 $0 \sim \pi B$ ,即达到几十至数百兆个余弦函数周期, $t^2 \cos(2\pi k t^2)$ 项基本上关于零对称分布,对其积分则大部分面积将抵消,相对于 $t^2$ 积分项可忽略不计,即

$$\int_{-T/2}^{T/2} t^2 dt \gg \int_{-T/2}^{T/2} t^2 \cos(2\pi k t^2) dt$$

经过仿真验证,若 $T = 30 \mu\text{s}$ , $B = 10 \text{ MHz}$ 时,

$$\begin{aligned} \int_{-T/2}^{T/2} t^2 dt &= 2.25 \times 10^{-15} \\ \max \left| \int_{-T/2}^{T/2} t^2 \cos(2\pi k t^2) dt \right| &= 2.67 \times 10^{-19} \end{aligned}$$

两者相差4个数量级,带宽 $B$ 越大,比值越大。因此式(8)可近似为

$$\begin{aligned} P_J &\approx \frac{2(\pi k A)^2 \sigma_j^2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} t^2 dt \\ &= \frac{2(\pi k A)^2 \sigma_j^2}{T} \left( \frac{t^3}{3} \right) \Big|_{-T/2}^{T/2} = \frac{(\pi A B \sigma_j)^2}{6} \quad (9) \end{aligned}$$

时钟抖动引起的信噪比为

$$\begin{aligned} \text{SNR}_{\text{LFMJ}} &= 10 \lg \left( \frac{P_s}{P_J} \right) \approx 10 \lg \left( \frac{A^2/2}{(\pi A B \sigma_j)^2/6} \right) \\ &= 10 \lg \left( \frac{3}{\pi^2 B^2 \sigma_j^2} \right) \quad (10) \end{aligned}$$

同时考虑量化信噪比情况下信噪比为

$$\begin{aligned} \text{SNR}_{\text{LFMJQ}} &= 10 \lg \left( \frac{P_s}{P_J + P_Q} \right) \\ &\approx 10 \lg \left( \frac{A^2/2}{(\pi A B \sigma_j)^2/6 + A^2/3 \cdot 4^N} \right) \\ &= 10 \lg \frac{3 \cdot 4^N}{(2^N \pi B \sigma_j)^2 + 2} \quad (11) \end{aligned}$$

由式(10)可以看出时钟抖动对线性调频信号信噪比的影响主要由带宽 $B$ 和时钟抖动均方值 $\sigma_j$ 有关。

## 2.3 时钟抖动对中频线性调频信号采样的影响

一般地,中频线性调频信号为

$$r_{\text{IF}}(t) = A \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) \cos(2\pi f_c t + \pi k t^2) \quad (12)$$

由时钟抖动产生的信号噪声和噪声功率分别为

$$\begin{aligned} n_{\text{IF}}(t) &= t_j \frac{dr_{\text{IF}}(t)}{dt} = -2\pi A \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) t_j \\ &\quad \cdot \sin(2\pi f_c t + \pi k t^2) (k t + f_c) \quad (13) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
P_j &= E \left[ \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} n^2(t) dt \right] = \frac{(2\pi A)^2}{T} E [t_j^2] \\
&\cdot \int_{-T/2}^{T/2} (kt + f_c)^2 \sin^2(\pi kt^2) dt \\
&= \frac{2(\pi A \sigma_j)^2}{T} \left[ \int_{-T/2}^{T/2} (kt + f_c)^2 dt \right. \\
&\quad \left. - \int_{-T/2}^{T/2} (kt + f_c)^2 \cos^2(2\pi kt^2 + 2\pi f_c t) dt \right] \quad (14)
\end{aligned}$$

与式(8), 式(9)同理, 式(14)中前项积分远大于后项积分, 为便于计算可舍去, 得到近似噪声功率为

$$\begin{aligned}
P_j &\approx \frac{2(\pi A \sigma_j)^2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} (kt + f_c)^2 dt \\
&= \frac{2(\pi A \sigma_j)^2}{3kT} (kt + f_c)^3 \Big|_{-T/2}^{T/2} \\
&= \frac{2(\pi A \sigma_j)^2}{3kT} (kt + f_c)^3 \Big|_{-T/2}^{T/2} \\
&= \frac{2(\pi A \sigma_j)^2}{3kT} (3kTf_c^2 + k^3T^3/4) \\
&= \frac{1}{6} (12f_c^2 + B^2) (\pi A \sigma_j)^2 \quad (15)
\end{aligned}$$

时钟抖动引起的中频线性调频信号信噪比为

$$\begin{aligned}
\text{SNR}_{\text{IFLFMJ}} &= 10 \lg \left( \frac{P_s}{P_j} \right) \approx 10 \lg \left[ \frac{A^2/2}{\frac{1}{6} (12f_c^2 + B^2) (\pi A \sigma_j)^2} \right] \\
&= 10 \lg \left( \frac{3}{(12f_c^2 + B^2) \pi^2 \sigma_j^2} \right) \quad (16)
\end{aligned}$$

同时考虑量化噪声情况下信噪比为

$$\begin{aligned}
\text{SNR}_{\text{IFLFMJQ}} &= 10 \lg \left( \frac{P_s}{P_j + P_Q} \right) \\
&\approx 10 \lg \left( \frac{A^2/2}{(12f_c^2 + B^2) (\pi A \sigma_j)^2 / 6 + A^2 / 3 \cdot 4^N} \right) \\
&= 10 \lg \frac{3 \times 4^N}{(12f_c^2 + B^2) (2^N \pi \sigma_j)^2 + 2} \quad (17)
\end{aligned}$$

图3为孔径抖动与带通采样线性调频信噪比关系, 可见中频带通采样相对基带采样, 信号信噪比对时钟抖动更加敏感, 影响明显, 对时钟抖动性能要求更加严格, 需要采取相应措施尽量减小时钟抖动。

以上分析是在奈奎斯特采样频率下分析的结果, 在中频采样及带通采样模式下, 可能存在过采样现象, 即采样率大于信号带宽的2倍。从频域上看, 此时信号带宽只占归一化带宽的一部分, 如果

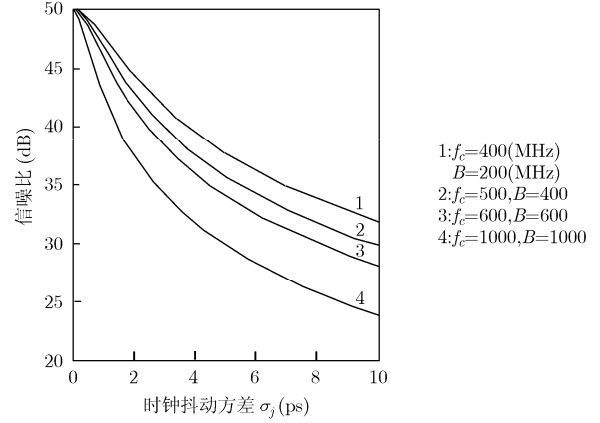


图3 孔径抖动与带通采样线性调频信噪比关系

采用滤波器滤除带外噪声信号, 噪声总功率会相应减小, 即提高了信号信噪比。此时, 式(17)修正为

$$\begin{aligned}
\text{SNR}_{\text{IFLFMJQ}} &= 10 \lg \frac{3 \times 4^N}{(12f_c^2 + B^2) (2^N \pi \sigma_j)^2 + 2} \\
&\quad + 10 \lg \left( \frac{f_s}{2B} \right) \quad (18)
\end{aligned}$$

其中  $f_s$  为采样率  $B$  为信号带宽, 可以看出过采样可以带来信噪比的改善。一定程度上可弥补时钟抖动引起的信噪比恶化。

根据以上所得信噪比计算公式, 可以得到满足系统性能指标前提下最大可容忍时钟抖动均方根值  $t_j$ , 这个值包括了 ADC 本身的孔径抖动均方根值  $t_{\text{aperture}}$ 。因此实际可容忍的最大采样时钟抖动  $t_{\text{clkj}}$  应减去 ADC 内部孔径抖动:

$$t_{\text{clkj}}^2 = t_j^2 - t_{\text{aperture}}^2 \quad (19)$$

以 MAX104 为例, 器件手册上孔径抖动时间标称为  $t_{\text{aperture}} = 0.5 \text{ ps}$ , 若  $t_j = 1.2 \text{ ps}$  则有

$$t_{\text{clkj}} = \sqrt{t_j^2 - t_{\text{aperture}}^2} = \sqrt{1.2^2 - 0.5^2} \approx 1.1(\text{ps}) \quad (20)$$

## 2.4 时钟抖动对合成孔径雷达脉冲压缩性能的影响

合成孔径雷达成像的基本原理是发射宽带信号, 在方位向和距离向使用参考函数对回波信号进行匹配滤波, 得到地物的灰度图像。以点目标距离向压缩为例, 含有时钟抖动和量化误差噪声线性调频信号如式(21), 脉冲压缩后的信号为

$$s(t) = \text{rect} \left( \frac{t}{2T} \right) \exp \left( \frac{t}{T} \right) e^{j\pi kt^2} + n(t) \quad (21)$$

$$\begin{aligned}
s_o(t) &= s(t) \otimes s^*(t) \\
&= \exp \left( \frac{t}{T} \right) e^{j\pi kt^2} \otimes s^*(t) + n(t) \otimes s^*(t) \\
&= T \text{rect} \left( \frac{t}{2T} \right) \frac{\sin[\pi B(1 - |t/T|)t]}{\pi Bt} + n(t) \otimes s^*(t) \quad (22)
\end{aligned}$$

其中  $B$  为信号带宽, 压缩后点目标信号变为具有尖峰形状的 sinc 函数, 而噪声信号与参考函数不相关, 卷积所得信号的最大幅度远小于点目标峰值。一般常用峰值旁瓣比(PSLR)(最大旁瓣与主瓣峰值比)和积分旁瓣比(ISLR)(旁瓣能量和与主瓣能量之比)来衡量回波脉冲压缩结果质量。在高斯白噪声影响下, 脉冲压缩后基底噪声升高, 但脉冲压缩结果位置不会发生平移<sup>[4]</sup>。sinc 函数包络最大副瓣电平为主瓣电平的-13.2 dB。旁瓣过高会导致弱目标信号模糊, 影响图像质量, 一般采用加窗处理来抑制旁瓣电平, 代价是降低了主瓣幅度, 展宽了主瓣宽度。即旁瓣抑制降低了信号信噪比及分辨率。仿真结果表明时钟抖动对 PSLR 值基本没有影响。

图 4 为时钟抖动对加窗前后不同信号带宽脉冲压缩 ISLR 的影响,  $B$  为基带信号带宽。可以看出未加窗脉冲压缩副瓣电平较高, 噪声相对较小, ISLR 较大时钟抖动引起的 ISLR 值变化很小, 说明对时钟抖动不敏感; 加窗后 ISLR 值整体明显变小, 但对时钟抖动比较敏感, 带宽越宽受到的影响越大。

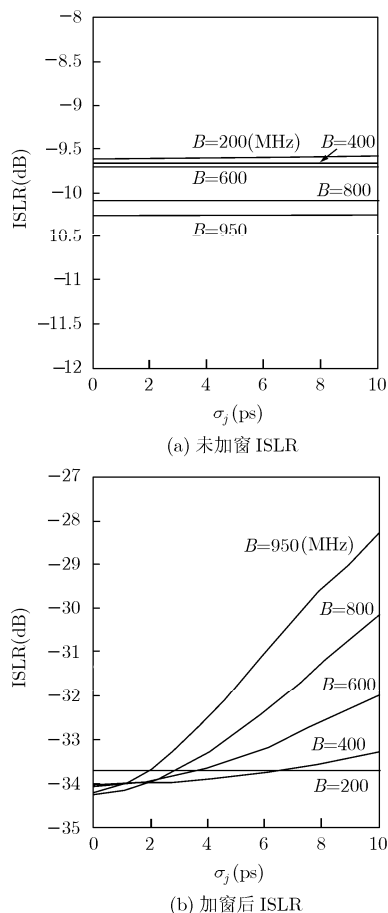


图 4 时钟抖动对距离向脉冲压缩的影响

### 3 时钟抖动抑制方法

由以上分析可以可知输入模拟信号频率越高、带宽越大, 时钟抖动对信噪比的影响越显著, 通常可通过以下措施来尽量减小时钟抖动:

(1) 根据系统性能指标要求选择符合要求的器件 选用采样保持电路孔径抖动小的 ADC、高精度稳定度晶振; 若 TTL/CMOS 时钟器件抖动会引入  $p$  秒级的抖动, 因此要使用抖动更小的如 ECL 等电平的输入输出门电路时钟管理器件; 必要时增加时钟抖动抑制器件和电路。

(2) 优化布局布线、保持良好电磁兼容环境 晶振外壳良好接地和屏蔽, 时钟信号布线尽量短, 使用差分传输线模式, 并在传输线附近和下层铺设地平面并做好端接匹配。在有些应用中需要将时钟扇出到多个高速 ADC 并行工作, 采用功分器引入的抖动较小, 如果要使用时钟扇出器件要注意器件的相关参数。

(3) 供电与散热 尽量使用线性电源供电并使用高频钽电容陶瓷电容为电源滤波去耦; 模拟地和数字地使用磁珠单点连接。ADC、晶振等器件稳定度受工作温度影响较大, 采样率越高芯片发热量也越高, 同时对时钟抖动性能要求也越高, 采取良好的散热措施十分必要。

### 4 结束语

本文定量分析了时钟抖动对正弦信号, 基带和中频线性调频信号信噪比的影响, 给出了相关近似计算公式并经过仿真验证, 可方便地计算出各性能参数之间的关系, 为系统设计和工程实现提供便利。分析结果表明, 在数字接收机中常用的带通采样情况下, 输入信号频率越高带宽越大, 时钟抖动影响越严重, 载频变化比带宽改变影响更明显。时钟抖动对脉冲压缩结果的影响主要是增加了噪声基底, 时钟抖动对加窗后 ISLR 影响较大。最后讨论了减小时钟抖动的一些具体措施。

### 参考文献

- [1] Boerner W M. Recent advances in microwave multi-modal SAR remote sensing of the terrestrial covers[C]. International Conference on Recent Advances in Microwave Theory and Applications (MICROWAVE 2008), Jaipur, India, Nov. 21-24, 2008: 201-204.
- [2] Brenner A R and Roessing L. Radar imaging of urban areas by means of very high-resolution SAR and interferometric SAR[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(10): 2971-2982.
- [3] Ramon B, Michael E, and Richard B. Interferometric

- absolute phase determination with TerraSAR-X wideband SAR data[C]. IEEE Radar Conference, Pasadena, California, USA, May 4-8, 2009: 1-6.
- [4] Madden C, Oh K S, and Yuan X C. System level deterministic and random jitter measurement and extraction for multi-gigahertz memory buses[C]. IEEE 13th Topical Meeting on Electrical Performance of Electronic Packaging, Portland, Oregon, Oct. 25-27, 2004: 7-10.
- [5] Shinagawa M, Akazawa Y, and Wakimoto T. Jitter analysis of high-speed sampling systems [J]. *IEEE Journal Solid-state Circuits*, 1990, 25(1): 220-224.
- [6] Awad S S. Analysis of accumulated timing-jitter in the time domain [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1998, 47(1): 69-73.
- [7] Hajimiri A, Limotyrakis S, and Lee T H. Jitter and phase noise in ring oscillators[J]. *IEEE Journal of Solid-state Circuits*, 1999, 34(6): 790-804.
- [8] Walden R H. Analog-digital converter survey and analysis [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1999, 17(4): 539-550.
- [9] Ahmed W K M. Quantization noise suppression in digitally segmented amplifiers[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2009, 56(3): 529-540.
- [10] Kobayashi H, Morimura M, Kobayashi K, and Onaya Y. Aperture jitter effects in wideband ADC systems[C]. 38th Annual Conference Proceedings of the SICE. Morioka, Japan, Jul. 28-30, 1999: 1089-1094.
- [11] Kurosawa N, Kobayashi H, and Kogure H, *et al.* Sampling jitter and finite aperture time effects in wideband data acquisition systems[J]. *IEICE Transactions on Fundamentals*, 2002, E85-A(2): 335-346.
- [12] Michael L and Gerhare F. The effects of aperture jitter and clock jitter in wideband ADCs[J]. *Computer Standards & Interfaces*, 2007, 29(1): 11-18.
- [13] 唐婷, 何子述, 韩春林, 李会勇. 基于线性调频信号的 ADC 时钟抖动误差分析[J]. *系统工程与电子技术*, 2008, 30(6): 1008-1021.  
Tang Ting, He Zi-shu, Han Chun-lin, and Li Hui-yong. Analysis of shaking error in ADC based on linear frequency modulated signal[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2008, 30(6): 1008-1021.
- [14] 田新远, 董戈, 朱敏慧. 波形存储 LFM 信号源设计误差分析 [J]. *电子与信息学报*, 2005, 27(8): 1240-1243.  
Tian Xin-yuan, Dong Ge, and Zhu Min-hui. Analysis of errors in waveform storage LFM generator design[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2005, 27(8): 1240-1243.
- 陈佳民: 男, 1975 年生, 博士, 从事合成孔径雷达数字信号处理技术研究.
- 童智勇: 男, 1966 年生, 博士后, 从事合成孔径雷达数字信号处理技术研究.
- 杨汝良: 男, 1943 年生, 研究员, 从事星载、机载合成孔径雷达系统研究.