

文章编号: 1671-0576(2022)03-0043-06

# 基于 AD9361 的中频幅相误差自校准方法

董国英, 范明慧, 彭 澎, 陈宇贤, 林加涛

(上海无线电设备研究所, 上海 201109)

**摘 要:** 基于 AD9361 实现的中频多输入多输出(MIMO)通信系统中, 由于多芯片间本振锁定时存在随机相位差, 且经过滤波及模数/数模转换等处理, 导致多通道间存在幅相误差。针对该问题提出一种收发通道幅相误差自校准方法。该方法通过选择一定长度的采样数据, 对其进行快速傅里叶变换(FFT), 并进行幅相误差估计, 可以方便快捷地实现通道间幅度相位误差的自动校准, 且校准精度高, 信噪比性能好。校准后通道间一致性较好, 从而保证了后续波束成形的方向图性能。

**关键词:** 幅相误差; 自校准; 多输入多输出

**中图分类号:** TN914.42

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1671-0576.2022.03.008

## Self-calibration Method of Intermediate Frequency Amplitude and Phase Error Based on AD9361

DONG Guoying, FAN Minghui, PENG Peng, CHEN Yuxian, LIN Jiatao

(Shanghai Radio Equipment Research Institute, Shanghai 201109, China)

**Abstract:** In intermediate frequency (IF) multiple input multiple output (MIMO) communication system based on AD9361, due to the random phase difference of local oscillator (LO) locking between multiple chips, as well as filtering, analog to digital/digital to analog conversion and other processing, there are amplitude and phase errors between multiple channels. To solve this problem, self-calibration method of transceiver channels is introduced. By selecting sampling data sequence and performing fast Fourier transform (FFT) calculation, this method can conveniently and quickly realize the automatic calibration of amplitude and phase errors between channels, with high calibration accuracy and good signal-to-noise ratio performance. Good consistency can be obtained between channels after calibration, so as to ensure the performance of following beam forming.

**Key words:** amplitude and phase error; self-calibration; MIMO

## 0 引言

相控阵天线具有波束指向捷变、定向增益高、空域抗干扰能力强等优点,被广泛应用于超远距离通信、抗电磁环境干扰等领域。在多输入多输出(MIMO)通信系统中,多采用全集成式片上系统解决方案。AD9361 是一款集成了双收发通道的全集成式 MIMO 收发器,因其超高集成度及低功耗的优势成为 MIMO 系统设计的首选芯片。该芯片集成了双通道本振、混频、滤波、模数/数模(AD/DA)转换等处理电路,但其收发通道本振末级分频阵列存在锁定时相位不确定的问题,会造成多芯片本振之间相位不同步,需要采用外部校准机制以消除相位的不确定性。

文献[1]通过在空间设置一个方位精确已知的辅助信源来对联合幅相误差进行校准,但此方法只适于幅相误差的静态校准。文献[2-3]基于最小均方误差(MMSE)或线性约束最小方差(LCMV)准则,通过矩阵或者迭代运算得到自适应滤波器的最优权值,从而实现通道幅相的校准。但该方法存在计算复杂、对硬件资源要求高的问题。

本文提出一种基于 AD9361 的多通道中频幅相误差自动校准方法,充分利用集成芯片的多通道特性,采用全相位快速傅里叶变换(FFT)频谱分析法,计算通道间幅度和相位误差,实现多通道幅相误差的自校准。

## 1 多通道幅相校准

### 1.1 校准原理

#### (1) 接收通道校准

将同一校准源信号分路到多个接收通道进行接收通道间的幅相校准。校准源信号

$$s_{\text{source}}(t) = A_0 \exp(j(2\pi f_0 t + \varphi_0)) \quad (1)$$

式中:  $A_0$ 、 $f_0$ 、 $\varphi_0$  分别为校准源信号的幅度、频率和初相。

校准源信号功分到各个接收通道后进行混频、滤波、模数转换等处理,由于多个混频本振间存在相位差,以及滤波、模数转换等处理的不一致性,使得处理后各接收通道信号幅度和相位各不

相同。第  $i$  个接收通道信号

$$s_{\text{R}}^i = A_{\text{R}}^i \exp(j(2\pi f_0 t + \varphi_{\text{R}}^i)), \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

式中:  $A_{\text{R}}^i$ 、 $\varphi_{\text{R}}^i$  分别为第  $i$  个接收通道信号的幅度和初相;  $N$  为通道个数。

选取其中一个通道作为参考通道,将其它通道和参考通道进行比较,得到通道校准系数,并对该通道进行补偿,实现接收通道校准<sup>[4-9]</sup>。假设各接收通道本振频率与校准源信号的频率一致,则第  $i$  个接收通道的校准系数

$$c_{\text{R}}^i = \Delta A_{\text{R}}^i \exp(j\Delta\varphi_{\text{R}}^i), \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

式中:  $\Delta A_{\text{R}}^i$ 、 $\Delta\varphi_{\text{R}}^i$  分别为第  $i$  个接收通道的幅度误差和相位误差。若选取通道 1 为参考通道,则

$$\begin{cases} \Delta A_{\text{R}}^i = A_{\text{R}}^1 / A_{\text{R}}^i \\ \Delta\varphi_{\text{R}}^i = \varphi_{\text{R}}^1 - \varphi_{\text{R}}^i \end{cases} \quad (4)$$

#### (2) 发射通道校准

将同一基带信号输入到不同的发射通道进行变频发射。各发射通道输出信号再经过选择器选择,分时输入同一个接收通道进行变频接收。根据该接收通道的输出信号计算发射通道的幅相误差,并进行补偿<sup>[8,10-12]</sup>。

同一基带信号经过不同发射通道,各通道间存在幅相不一致性。第  $i$  个发射通道信号

$$s_{\text{T}}^i = A_{\text{T}}^i \exp(j(2\pi f_{\text{T}} t_{\text{T}}^i + \varphi_{\text{T}}^i)), \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

式中:  $A_{\text{T}}^i$  为第  $i$  个发射通道信号的幅度;  $f_{\text{T}}$  为发射信号的频率;  $t_{\text{T}}^i$  为第  $i$  个发射通道信号分时发送的发送时间;  $\varphi_{\text{T}}^i$  为第  $i$  个发射通道信号的初相。

发射信号与接收本振混频,输出基带信号。假设各发射通道信号频率与接收本振的频率一致,则接收本振信号

$$s_{\text{osc}}(t) = \exp(j(2\pi f_{\text{T}} t + \varphi_{\text{osc}})) \quad (6)$$

式中:  $\varphi_{\text{osc}}$  为本振信号的初相。

假设各发射通道信号频率与接收机本振的频率一致,且不考虑接收通道增益损失,则第  $i$  个发射通道信号与接收通道本振混频后的输出信号

$$s_{\text{M}}^i(t) = A_{\text{T}}^i \exp(j[2\pi f_{\text{T}}(t_{\text{T}}^i - t) + (\varphi_{\text{T}}^i - \varphi_{\text{osc}})]) \quad (7)$$

从式(7)可以看出,因  $t_{\text{T}}^i - t$  为第  $i$  个发射通

道信号的传输时延,只要各发射通道等长布线,保证传输时延相同,对不同发射通道来说,通道特性差异就只与  $A_T^i, \varphi_T^i$  有关。因此选取其中一个发射通道作为参考通道,可计算出各发射通道间的幅相差异,进而进行校准。第  $i$  个发射通道的校准系数

$$c_T^i = \Delta A_T^i \exp(j\Delta\varphi_T^i), \quad (8)$$

$$i = 1, 2, \dots, N$$

式中:  $\Delta A_T^i, \Delta\varphi_T^i$  分别为第  $i$  个发射通道的幅度误差和相位误差。若选取发射通道 1 为参考通道,则

$$\begin{cases} \Delta A_T^i = A_T^1 / A_T^i \\ \Delta\varphi_T^i = \varphi_T^1 - \varphi_T^i \end{cases} \quad (9)$$

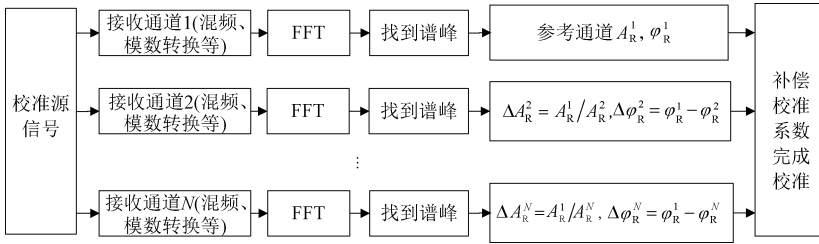


图 1 接收通道幅相校准流程

(2) 发射通道校准

基带信号经过不同发射通道的混频、数模转换等处理,会引入幅相误差。不同发射通道信号被分时选择输入同一接收通道,接收通道对分时信号进行采样、存储;对模数转换后的数字信号进

1.2 校准算法

采用全相位 FFT 频谱分析法<sup>[13-16]</sup>估计各通道信号的幅度和相位,进而计算通道间的幅相误差并进行补偿。全相位 FFT 频谱分析法通过选择一定长度的数据序列,并对其进行 FFT,根据 FFT 最大谱线的相位进行初相估计。

(1) 接收通道校准

窄带系统可选取点源作为校准源。校准源信号经过各接收通道的混频、模数转换处理,将引入幅相误差。将各接收通道模数转换后的数字信号进行 FFT,搜索各信号频域最大谱线(谱峰)。选取其中一个通道为参考通道,其它通道信号的幅相值与参考通道的相比,得到该通道的幅相校准系数。接收通道幅相校准流程如图 1 所示。

行 FFT,搜索各信号频域 FFT 最大谱线(谱峰);选取其中一个通道为参考通道,其它通道信号的幅相值与参考通道的相比,得到该通道的校准系数。发射通道幅相校准流程如图 2 所示。

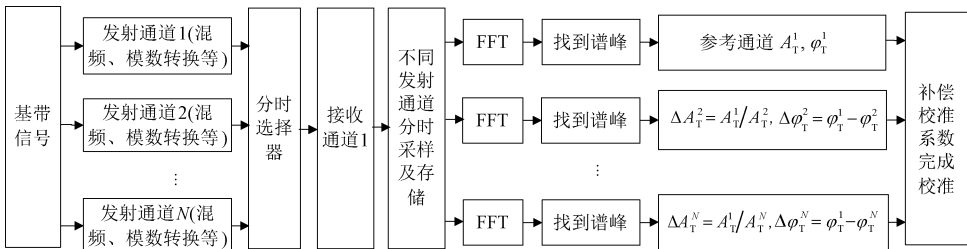


图 2 发射通道幅相校准流程

1.3 校准电路设计

AD9361 在集成化、小型化、低功耗等方面具有突出优势,因此消除多个 AD9361 间本振引入的相位误差后,可为 MIMO 通信系统提供多通道小型化的中频信号幅相校准解决方案。

每个 AD9361 集成了双通道接收器和双通道发射器。双通道之间共用本振,每通道接收器包

括 R\_A, R\_B, R\_C 三个输入端口,每通道发射器包含 T\_A, T\_B 两个输出端口,这给自动校准提供了便利的条件。

由于 R\_A, R\_B, R\_C 三个端口共本振,本方法采用端口 R\_B 进行校准,校准完成后软件切换到端口 R\_A 进行正常工作状态的收发。M 个 AD9361 的接收通道校准电路原理图如图 3

所示。

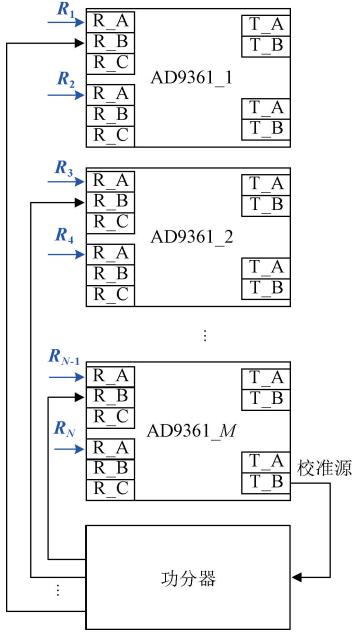


图 3 接收通道校准电路

从图 3 中可以看出,选取第  $M$  个芯片的一个发射通道端口  $T_B$  发送校准源信号,经过功分器分路到其它各个芯片接收通道的端口  $R_B$ ,端口  $R_B$  的接收信号经过混频、模数转换后送给 FPGA,进行校准系数的计算。校准完成后,正常工作模式下接收信号  $R_1 \sim$  接收信号  $R_N$  通过端口  $R_A$  进行接收。发射通道校准电路原理图如图 4 所示。从图中可以看出,第  $M$  个芯片的一个发射通道端口  $T_B$  的输出信号经选择器,被分时接入芯片 1 的一个接收通道端口  $R_B$ ,端口  $R_B$  接收到的信号经过混频和模数转换后送给 FPGA,进行校准系数的计算。校准完成后,正常工作模式下发射信号  $T_1 \sim$  发射信号  $T_N$  通过端口  $T_A$  进行发射。

### 1.4 自校准流程

基于 AD9361 的中频幅相误差校准采用自校准方法,自校准流程如图 5 所示。产品上电后,将 AD9361 各收发通道配置工作在端口  $R_B$  和端口  $T_B$ ;接收通道校准时,先产生校准源信号,再将校准源信号分路发送至各芯片的端口  $R_B$ ;发射通道校准时,各芯片端口  $T_B$  的发射信号分时选

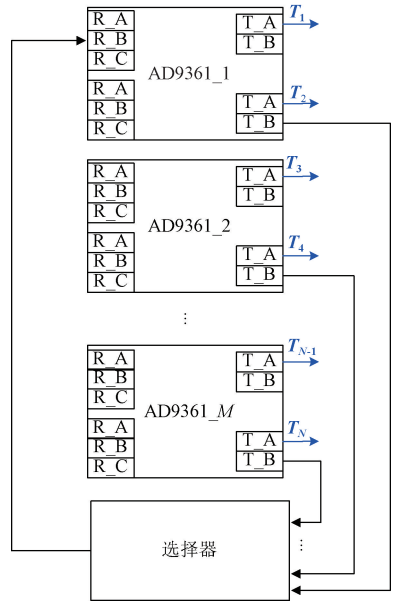


图 4 发射通道校准电路

通到某一接收通道的端口  $R_B$ ;采样、存储端口  $R_B$  接收的数据,计算校准系数;接收通道配置 AD9361 从端口  $R_B$  切换到端口  $R_A$ ,发射通道配置 AD9361 从端口  $T_B$  切换到端口  $T_A$ ,对应通道乘以校准系数完成校准。该方法的所有计算和时序控制均基于 FPGA 自闭环完成,可以方便快捷地完成收发自校准。该方法可用于 MIMO 通信系统中频自校准的实现。

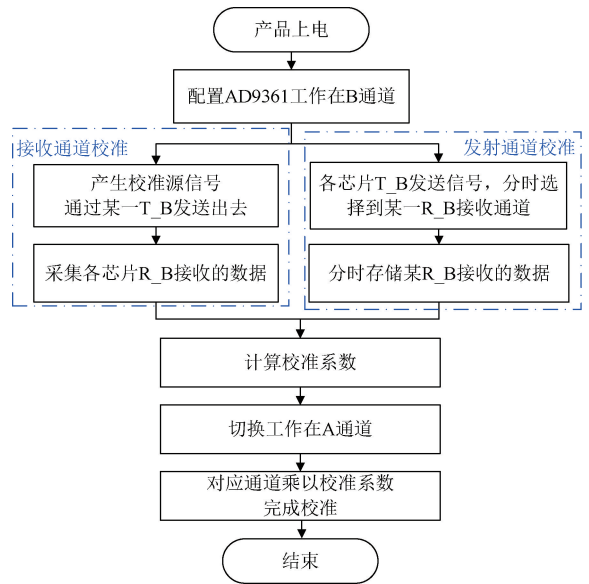


图 5 自校准流程

## 2 仿真性能分析

### 2.1 幅相误差的影响

以16阵元线阵、波束指向在 $20^\circ$ 方向的情况为例,仿真幅度和相位误差对波束形成性能的影响。当各阵元相位误差为均值 $38^\circ$ 、标准差 $5.2^\circ$ 的高斯分布,幅度误差为均值 $0.4\text{ V}$ 、标准差 $0.3\text{ V}$ 的高斯分布时,天线方向图如图6所示。相位误差均值进一步加大至 $53^\circ$ ,天线方向图如图7所示。从图6可以看出,幅相误差对天线方向图副瓣的影响很大,随着扰动的增强,副瓣电平被抬高。从图7可以看出,当相位误差较大时,波束的指向也会受到影响,指向偏差 $2.3^\circ$ 。可知,较大的幅度和相位误差会使天线方向图性能严重恶化,阵列天线中存在多通道接收时,必须进行通道间幅度和相位误差的校准。

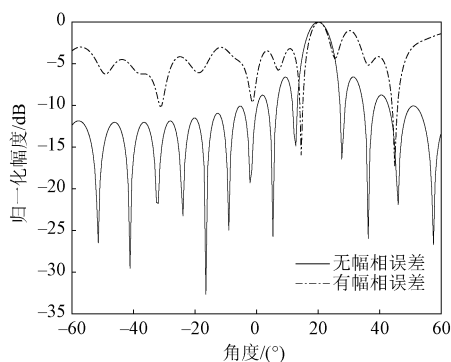


图6 幅相误差对天线方向图的影响

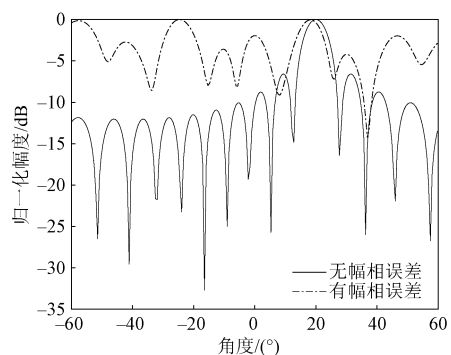


图7 大相位误差对天线波束指向的影响

### 2.2 校准性能

通道1发送单频信号,设置通道2~通道4的幅相误差分别为 $0.75\exp(j\pi)$ , $0.5\exp(j\pi/3)$ , $0.8\exp(j\pi/6)$ 。

校准前后四路信号的波形分别如图8和图9所示。可以看出,校准后四路信号幅相一致性很好,四路信号完全重合,通道间误差被补偿。

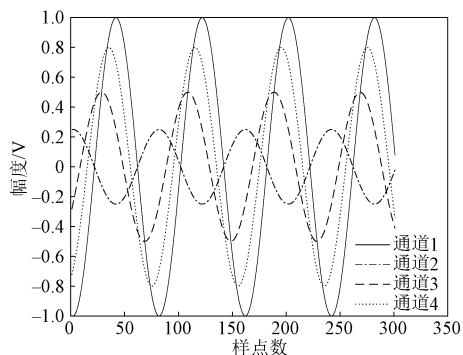


图8 校准前四路信号

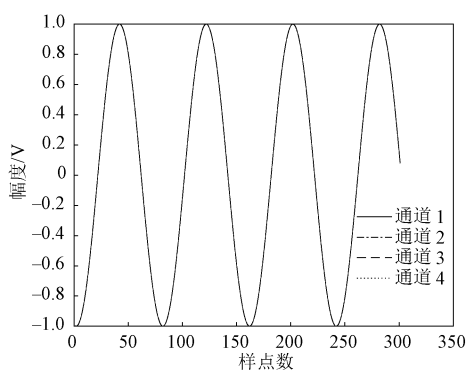


图9 校准后四路信号

对低信噪比( $S/N$ ) (以 $S/N = 5\text{ dB}$ 为例)信号进行校准,通道1作为参考通道,通道2作为校准通道,校准前后波形分别如图10和图11所示,校准通道的相位误差如图12所示。对比图10和图11可以看出,对低信噪比信号校准后,信号幅相一致性较好,通道间误差被补偿。从图12可以看出,补偿后通道间幅相误差很小,对波束形成性能不再有影响。

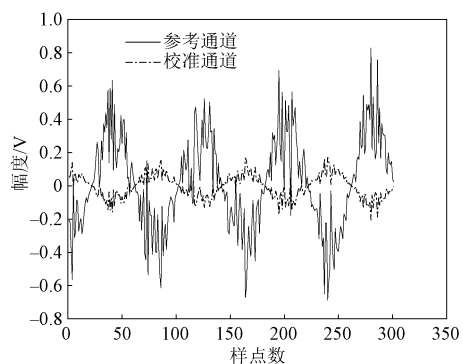


图10 校准前通道信号

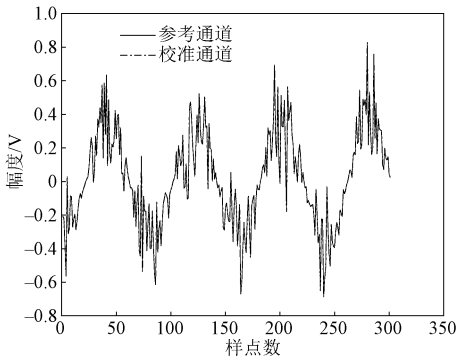


图 11 校准后通道信号

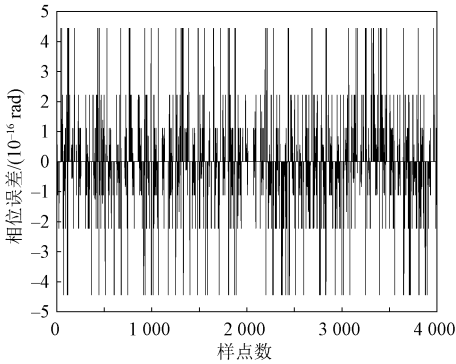


图 12 校准通道的相位差

### 3 结束语

在基于 AD9361 实现多通道中频处理的 MIMO 通信系统中,由于多片 AD9361 间本振锁定时存在随机相位差,同时中频滤波、模数转换等处理导致通道间存在幅相误差。为解决上述问题,本文提出了一种收发通道自校准方法。基于该方法可以方便快捷地实现通道间幅相误差的自动校准,且校准精度高,信噪比性能好,从而为后续的波束形成提供准确的参考相位。

### 参考文献

[1] 杨明磊. 微波稀布阵 SIAR 相关技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2009: 66-74.  
 [2] 王晓君, 李玉莹, 王彦朋. 一种导航宽带抗干扰中

的阵列幅相误差校正算法[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(28): 123-127.

- [3] 龚广伟. 无线接收机前段设计及多通道校准技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2009: 50-58.  
 [4] 熊哲. 幅相误差对相控阵天线的性能影响研究[D]. 北京: 中国舰船研究院, 2012: 15-23.  
 [5] 黄雷, 王萍, 周哲帅, 等. 相控阵快速校准系统研究[J]. 电子科学技术, 2016, 3(4): 468-470.  
 [6] 王志永, 刘磊浩, 高杰. 一种低轨卫星接收的相控阵天线校准方法[J]. 无线电通信技术, 2019, 45(3): 301-304.  
 [7] 王震, 丁卓富, 陈超. 一种耦合形式的相控阵自校准技术[J]. 电子信息对抗技术, 2020, 35(1): 72-75, 88.  
 [8] 陈彦来, 王琦, 赵中兴. 一种相控阵雷达收发通道幅相一致性校准方法[J]. 舰船电子工程, 2018, 38(5): 47-52.  
 [9] 冷红英, 张扬, 唐斌. 阵列通道误差校正算法及 DSP 实现[J]. 电子科技大学学报, 2004, 33(5): 511-514.  
 [10] 左平. 有源相控阵雷达多通道幅相校准研究[J]. 现代雷达, 2009, 31(10): 14-16.  
 [11] 鲁加国, 吴曼青, 陈嗣乔, 等. 基于 FFT 的相控阵雷达校准方法[J]. 电波科学学报, 2000, 15(2): 221-224.  
 [12] 吴露露, 杨春兰, 余岚. 有源相控阵的幅相误差校正和波束形成一体化方法[J]. 现代雷达, 2011, 33(9): 65-68.  
 [13] 齐国清, 贾欣乐. 基于 DFT 相位的正弦波频率和初相的高精度估计方法[J]. 电子学报, 2001, 29(9): 1164-1167.  
 [14] 丁康, 钟舜聪. 通用的离散频谱相位差校正方法[J]. 电子学报, 2003, 31(1): 142-145.  
 [15] 李醒飞, 李立. 全相位 FFT 时移相位差频谱校正分析及改进[J]. 天津大学学报, 2016, 49(12): 1290-1295.  
 [16] 黄翔东, 王兆华. 基于全相位频谱分析的相位差频谱校正法[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(2): 293-297.