

DOI:10.11918/202503043

基于 Kalman 滤波的 IQ 失配校正算法

姚亚峰,胡子妍,周群群,徐洋洋

(中国地质大学(武汉)机械与电子信息学院,武汉 430074)

摘要:为提高零中频接收机中正交(in-phase quadrature, IQ)失配信号校正的收敛速度与鲁棒性,本文将 Kalman 滤波算法与盲源分离结构结合,提出了一种基于双通道 Kalman 滤波的校正算法。该算法通过状态空间建模与协方差自适应更新,能够在动态环境下实现更高效、稳定的参数估计,从而实现对 IQ 失配信号的有效补偿。将本文算法与最小均方算法(least mean square, LMS)、归一化最小均方算法(normalized least mean square, NLMS)和仿射投影算法(affine projection algorithm, APA)进行对比仿真,结果显示,校正后信号的镜像抑制比(image rejection ratio, IRR)均达到约 45 dB,但双通道 Kalman 滤波算法对应的 IRR 曲面图更加平滑,同时,16QAM 和 16PSK 调制方式下该算法的误符号率最低,表明本文算法能够有效实现 IQ 失配校正,具有较好的稳定性。本文算法迭代约 50 次时,均方误差收敛趋近于 0,而 LMS、NLMS 和 APA 算法则分别需要迭代约 500 次、400 次和 200 次才能够收敛,表明该算法具有较好的收敛性。通过参数的敏感性仿真分析,在较大的参数范围内本文算法达到的 IRR 差别甚微,具有良好的鲁棒性。

关键词: 零中频接收机; IQ 失配; Kalman 滤波; 数字信号处理; 镜像抑制比

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2026)01-0131-09

IQ mismatch correction algorithm based on kalman filter

YAO Yafeng, HU Ziyang, ZHOU Qunqun, XU Yangyang

(School of Mechanical Engineering and Electronic Information, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: To improve the convergence speed and robustness of in-phase quadrature (IQ) imbalance correction in zero-IF receivers, this study integrates the Kalman filtering algorithm with a blind source separation structure and proposes a dual-channel Kalman filter-based correction method. By leveraging state-space modeling and adaptive covariance updates, the proposed algorithm enables more efficient and stable parameter estimation in dynamic environments, thereby achieving effective compensation for IQ mismatch. Comparative simulations were conducted between the proposed algorithm and the least mean square (LMS), normalized least mean square (NLMS), and affine projection algorithm (APA). The results show that the image rejection ratio (IRR) of the corrected signals reaches approximately 45 dB for all methods. However, the IRR surface of the proposed dual-channel Kalman filtering algorithm is smoother. Additionally, under 16QAM and 16PSK modulation schemes, the proposed algorithm yields the lowest symbol error rate (SER), indicating improved correction performance and stability. The algorithm also demonstrates superior convergence, with its mean squared error (MSE) approaching zero after approximately 50 iterations, while LMS, NLMS, and APA require about 500, 400, and 200 iterations, respectively, to converge. Furthermore, sensitivity analysis reveals that the IRR variation remains minimal across a wide range of parameter settings, demonstrating the robustness of the proposed algorithm.

Keywords: zero-IF receiver; IQ mismatch; Kalman filter; digital signal processing; image rejection ratio

随着第五代移动通信、物联网和毫米波技术的快速发展,现代无线通信系统对射频收发机的功耗、成本和频谱效率产生了更高的要求^[1]。在此背景下,零中频接收机凭借其独特的架构,已经成为软件无线电等系统的主要组件^[2]。特别是在消费类电

子产品、多模通信等应用领域,零中频接收机^[3]通过直接变频技术,极大程度地简化电路,降低了成本与功耗。但零中频结构也存在一些明显缺陷,例如本振泄露、直流偏置以及 IQ 失配等^[4-7]。其中, IQ 失配问题是制约通信系统误码率性能的关键因素,

收稿日期: 2025-03-14; 录用日期: 2025-07-14; 网络首发日期: 2025-08-29

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.t.20250829.0906.004>

基金项目: 国家自然科学基金(62301514)

作者简介: 姚亚峰(1970—),男,教授,博士生导师

通信作者: 周群群, zhouqunqun@126.com

其主要由器件的工艺局限性^[8-9]所致。在信号的正交调制与解调过程中,同相、正交两路信号无法完全实现幅度相同、相位差 90° 的理想状态^[10-11]。这种 IQ 失配问题会造成镜像干扰信号^[12] 的出现,从而影响基带信号的解调,降低接收器的性能^[13]。

针对零中频接收机中的 IQ 失配问题,现有的解决方案主要有模拟电路优化和数字域补偿两类^[14-15]。相较前者,数字域补偿校准技术研究^[16-18]更加广泛,可分为两类:一类是通过估计 IQ 失配参数构建校正结构,对接收的基带信号进行校正。另一类算法直接对失配信号进行补偿,使其接近理想的 IQ 信号,这类方法不依赖于特定的 IQ 失配模型。参数估计法具有良好的可解释性,有助于系统调试与硬件性能分析,但在动态通信系统中响应速度较慢。相关研究中,文献[19-20]基于信号的统计特征实现失配参数的盲估计;文献[21]利用最小二乘准则估计补偿系数;文献[22]提出了一种基于信号相位分布特性的新型参数估计算法。相比之下,直接补偿法无需显式的参数估计,并具备更高的实时性与实现效率。基于直接补偿的研究中,文献[23-24]引入卷积神经网络模型实现 IQ 失配校正;文献[25]实现了发送端与接收端的联合校正,通过最小二乘、预失真及自适应算法进行补偿;文献[26]分别从频域和时域上实现 IQ 失配的直接补偿。其中,文献[27-30]提出基于盲源分离结构的自适应滤波校正算法,使用 LMS 或快速牛顿横向导

波算法更新校正滤波器系数,虽然可提升实时性,但在收敛速度、噪声环境下的鲁棒性方面仍存在不足。Kalman 滤波算法作为一种经典的最优估计算法^[31],能够实现快速收敛,并在噪声条件下保持良好的参数跟踪能力,因此具备在直接补偿算法中的应用潜力。在 IQ 失配校正领域中,Kalman 滤波算法的应用仍较为有限。已有研究中,Xiang 等^[32]通过 Kalman 滤波算法,估计共轭信号模型中的逆矩阵系数,实现对 IQ 失配的直接补偿,并展现出极快的收敛速度,但在不同参数下的算法鲁棒性仍有局限。

为提高 IQ 失配校正性能,解决现有算法收敛速度较慢、参数鲁棒性不足的问题,本文将 Kalman 滤波算法与盲源分离结构相融合,提出一种新型的直接补偿方法。该方法旨在兼具盲源分离结构的模型适应性与 Kalman 滤波算法的快速收敛及稳定特性,从而为高精度、高动态通信环境下的信号处理提供一种更有效的解决方案,并展现出良好的应用前景。

1 IQ 失配模型

理想的 IQ 调制与解调模型如图 1 所示。I 路和 Q 路输入信号分别为 $x_I(t)$ 和 $x_Q(t)$,载波信号为 ω_c ,调制器将两路信号分别调制至载波的同向成分 $\cos(\omega_c t)$ 和正交成分 $\sin(\omega_c t)$ 上进行发送,解调器将接收信号通过低通滤波器(low pass filter, LPF)后恢复为原始的两路信号^[33]。

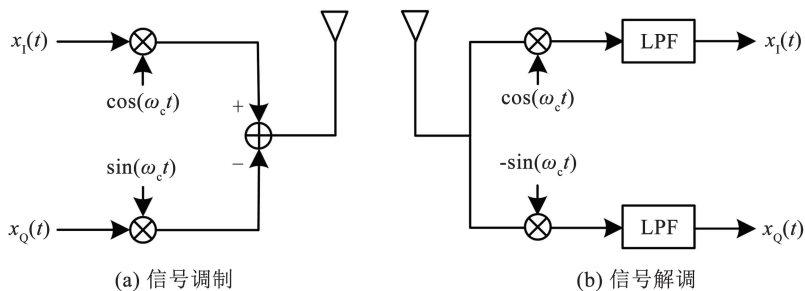


图 1 理想的 IQ 调制与解调模型

Fig. 1 Ideal IQ modulation and demodulation model

由于零中频接收机存在混频器的本振信号影响、IQ 通道模拟器件不完全匹配等问题,解调后的两路 IQ 信号不能保持原有的幅度相同和相位差 90° ,从而引起 IQ 失配问题。由本振信号导致的 IQ 失配属于频率无关失配,而由通道中模拟器件参数不一致引起的失配通常随频率变化而产生不同幅度与相位差异,属于频率相关失配。本文则由对本振信号导致的频率无关失配信号进行分析,并利用盲源分离结构的双通道 Kalman 滤波算法校正 IQ 失配信号。频率无关 IQ 失配解调模型如图 2 所示。

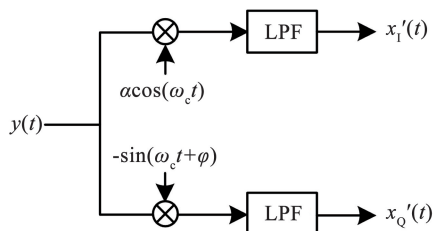


图 2 IQ 失配解调模型

Fig. 2 IQ mismatch demodulation model

当 IQ 失配完全由本振信号导致时,可将解调时失配的本振信号 $x_{LO}(t)$ 设为

$$x_{I0}(t) = \alpha \cos(\omega_c t) - j \sin(\omega_c t + \varphi) \quad (1)$$

式中: α 为幅度失配因子, φ 为相位失配因子, j 为虚数单位。

当系统输入信号为 $y(t)$, 此时正交解调的输出信号为

$$x'(t) = \text{LPF}\{y(t)x_{I0}(t)\} = \alpha x_1(t) + j[x_Q(t) \cos \varphi - x_I(t) \sin \varphi] \quad (2)$$

则输出信号的 IQ 两路信号可表示为

$$\begin{cases} x'_1(t) = \alpha x_1(t) \\ x'_Q(t) = x_Q(t) \cos \varphi - x_I(t) \sin \varphi \end{cases} \quad (3)$$

信号 $x_1(t)$ 和 $x_Q(t)$ 为理想的 IQ 解调信号, 两者相互正交、不存在相关性。当出现 IQ 失配问题时, 输出的 IQ 解调信号 $x'_1(t)$ 和 $x'_Q(t)$ 受相位和幅度失配因子影响, 不再完全正交。因此, 可将式(3)中失配信号 $x'_1(t)$ 和 $x'_Q(t)$ 表示为 $x_1(t)$ 和 $x_Q(t)$ 之间互相作用后产生的混合信号, 即将 IQ 失配信号看作 I 通道和 Q 通道之间存在交叉耦合的影响。相应的交叉耦合输出模型如图 3 所示, 图中 $h_{12}(n)$ 和 $h_{21}(n)$ 为交叉耦合滤波器系数, 由幅度 α 和相位 φ 失配因子决定。设理想信号为 $\mathbf{s}(n) = [s_1(n) \ s_Q(n)]^T$, 不平衡信号为 $\mathbf{m}(n) = [m_1(n) \ m_Q(n)]^T$ 。

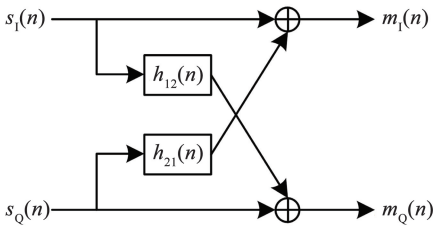


图 3 交叉耦合输出模型

Fig. 3 Cross-coupled output model

根据图 3 可得, 输出的失配信号分别为:

$$m_1(n) = s_1(n) + s_Q(n) * h_{21}(n) \quad (4)$$

$$m_Q(n) = s_Q(n) + s_1(n) * h_{12}(n) \quad (5)$$

式中 * 表示卷积运算。

2 盲源分离结构的双通道 Kalman 滤波算法

盲源分离技术为从未知的混合信号中分离出来的原始信号。本文将 IQ 失配信号看作 IQ 两路的混合信号, 因此可采用基于盲源分离结构的校正算法, 使用自适应滤波器从 IQ 混合信号中分离出理想的 IQ 信号。

基于盲源分离结构的校正模型如图 4 所示, 图中 $m_1(n)$ 和 $m_Q(n)$ 为 IQ 失配信号, $c_1(n)$ 和 $c_Q(n)$

为校正后的 IQ 信号, $w_{12}(n)$ 和 $w_{21}(n)$ 为滤波器的权值系数。

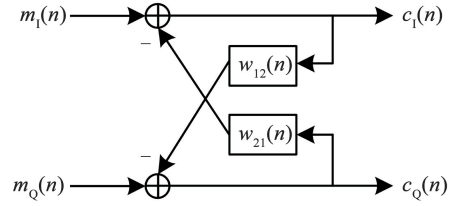


图 4 基于盲源分离结构的校正模型

Fig. 4 Calibration model based on blind source separation structure

根据以上校正结构, 可以得到输出的 IQ 信号为:

$$c_1(n) = m_1(n) - c_Q(n) * w_{21}(n) \quad (6)$$

$$c_Q(n) = m_Q(n) - c_1(n) * w_{12}(n) \quad (7)$$

将式(4)和(5)代入式(6)和(7), 计算得到:

$$c_1(n) * [1 - w_{12}(n) * w_{21}(n)] = (h_{21}(n) - w_{21}(n)) * s_Q(n) + [1 - w_{21}(n) * h_{12}(n)] * s_1(n) \quad (8)$$

$$c_Q(n) * [1 - w_{12}(n) * w_{21}(n)] = (h_{12}(n) - w_{12}(n)) * s_1(n) + [1 - w_{12}(n) * h_{21}(n)] * s_Q(n) \quad (9)$$

根据式(8)和(9)可知, 算法收敛到最优情况时, 权值系数变为 $w_{12}(n) = h_{12}(n)$ 和 $w_{21}(n) = h_{21}(n)$ 。此时, 校正后的 IQ 信号为 $c_1(n) = s_1(n)$ 和 $c_Q(n) = s_Q(n)$ 。因此, 权值收敛到一定值时, IQ 失配信号能够得到理想的校正。

为恢复不平衡信号, 本文提出一种基于盲源分离技术的双通道 Kalman 滤波算法, 如图 5 所示。该算法分别对 IQ 两通道进行滤波, 由 Kalman 滤波算法更新滤波器系数, 两条支路的校正过程相互影响。在算法实现部分, 为便于描述矩阵化的计算过程, 文中将部分变量采用粗体形式。仅用于强调其数值的计算属性, 与前文中符号表示同一物理量。

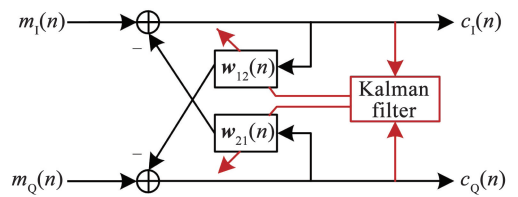


图 5 双通道 Kalman 滤波算法

Fig. 5 Dual-channel Kalman filter algorithm

根据图 5 可确定状态模型和测量模型。该算法将滤波器系数 $w_{12}(n)$ 和 $w_{21}(n)$ 看作是系统的状态。假设权值在每个时刻的变化为线性, 则理想情况下的状态转移方程为:

$$\mathbf{w}_{12}(n) = \mathbf{w}_{12}(n-1) + \boldsymbol{\eta}_{12}(n) \quad (10)$$

$$\mathbf{w}_{21}(n) = \mathbf{w}_{21}(n-1) + \boldsymbol{\eta}_{21}(n) \quad (11)$$

式中: 向量 $\mathbf{w}_{12}(n)$ 和 $\mathbf{w}_{21}(n)$ 为 n 时刻的权值, $\mathbf{w}_{12}(n) = [w_{12,0}(n), \dots, w_{12,L-1}(n)]^T$, $\mathbf{w}_{21}(n) = [w_{21,0}(n), \dots, w_{21,L-1}(n)]^T$, L 为滤波器阶数; 向量

$w_{12}(n-1)$ 和 $w_{21}(n-1)$ 为 $n-1$ 时刻的权值; $\eta_{12}(n)$ 和 $\eta_{21}(n)$ 为过程噪声, 设定为零均值的高斯噪声, 协方差矩阵分别为 Q_{12} 和 Q_{21} 。

该算法通过观测信号来进行权值更新, 根据输出信号定义观测信号, 则系统的测量模型为:

$$z_1(n) = m_1(n) - c_Q(n) \cdot w_{21}(n-1) + \gamma_{12}(n) \quad (12)$$

$$z_Q(n) = m_Q(n) - c_1(n) \cdot w_{12}(n-1) + \gamma_{21}(n) \quad (13)$$

式中: 观测信号 $z_1(n)$ 和 $z_Q(n)$ 为校正后的输出信号; 根据测量模型构造测量矩阵, I 支路和 Q 支路的测量矩阵分别为 $c_Q(n)$ 和 $c_1(n)$, $c_Q(n) = [c_Q(n), \dots, c_Q(n-L+1)]$, $c_1(n) = [c_1(n), \dots, c_1(n-L+1)]$; $\gamma_{12}(n)$ 和 $\gamma_{21}(n)$ 为观测噪声, 设定为零均值的高斯噪声, 方差为 R_{12} 和 R_{21} 。由式(8)和式(9)可知, 该算法的状态更新到一定值时, 系统的观测信号将会与理想情况的 IQ 信号相同。

首先进行状态预测和协方差预测。根据当前时刻的状态和状态转移方程, 预测下一时刻的状态为:

$$w_{12}(n|n-1) = w_{12}(n-1) \quad (14)$$

$$w_{21}(n|n-1) = w_{21}(n-1) \quad (15)$$

协方差预测是通过当前时刻的协方差以及过程噪声的协方差预测下一时刻的协方差:

$$p_{12}(n|n-1) = p_{12}(n-1) + Q_{12} \quad (16)$$

$$p_{21}(n|n-1) = p_{21}(n-1) + Q_{21} \quad (17)$$

式中: $w_{12}(n|n-1)$ 和 $w_{21}(n|n-1)$ 为 $n-1$ 时刻预测的下一时刻的权值, $p_{12}(n-1)$ 和 $p_{21}(n-1)$ 为 $n-1$ 时刻的协方差矩阵, $p_{12}(n|n-1)$ 和 $p_{21}(n|n-1)$ 为 $n-1$ 时刻预测的下一时刻的协方差矩阵。

根据状态和协方差的预测值更新 Kalman 增益:

$$k_{12}(n) = \frac{p_{12}(n|n-1) \cdot c_1^T(n)}{c_1(n) \cdot p_{12}(n|n-1) \cdot c_1^T(n) + R_{12}} \quad (18)$$

$$k_{21}(n) = \frac{p_{21}(n|n-1) \cdot c_Q^T(n)}{c_Q(n) \cdot p_{21}(n|n-1) \cdot c_Q^T(n) + R_{21}} \quad (19)$$

式中: 向量 $k_{12}(n) = [k_{12,0}(n), \dots, k_{12,L-1}(n)]^T$, 向量 $k_{21}(n) = [k_{21,0}(n), \dots, k_{21,L-1}(n)]^T$ 。

滤波器系数更新为:

$$w_{12}(n) = w_{12}(n|n-1) + k_{12}(n) \cdot (z_Q(n) - s_Q(n)) \quad (20)$$

$$w_{21}(n) = w_{21}(n|n-1) + k_{21}(n) \cdot (z_1(n) - s_1(n)) \quad (21)$$

协方差矩阵更新为:

$$p_{12}(n) = (I - k_{12}(n) \cdot c_Q(n)) \cdot p_{12}(n|n-1) \quad (22)$$

$$p_{21}(n) = (I - k_{21}(n) \cdot c_1(n)) \cdot p_{21}(n|n-1) \quad (23)$$

在每个不同的时刻, 迭代执行以上的预测、更新步骤。不断根据新的输入信号更新协方差矩阵和权值, 使得滤波器系数能够收敛到最优解, 即可恢复出理想信号。

3 仿真结果与分析

为了验证该算法的有效性, 本文对 IQ 失配信号进行仿真建模, 对比校正前后 IQ 信号的频谱图和星座图。仿真中设置信号的相位失配系数为 10° , 幅度失配系数为 1.1 倍, 滤波器阶数为 30, 过程噪声协方差矩阵为对角矩阵, 对角元素即过程噪声方差 Q 为 e^{-6} , 观测噪声方差 R 为 e^{-2} 。

图 6 给出了 IQ 失配信号为单频信号和多音信号时, 校正前后信号的频谱图。单频信号频率为 10 Hz, 多音信号频率分别为 10、110、210、310、410 Hz, 采样频率设置为 1 000 Hz。由图 6 可以观察到, 校正前信号的频谱在采样频率左侧存在明显的镜像干扰, 校正后各频率点的镜像信号均被有效抑制。

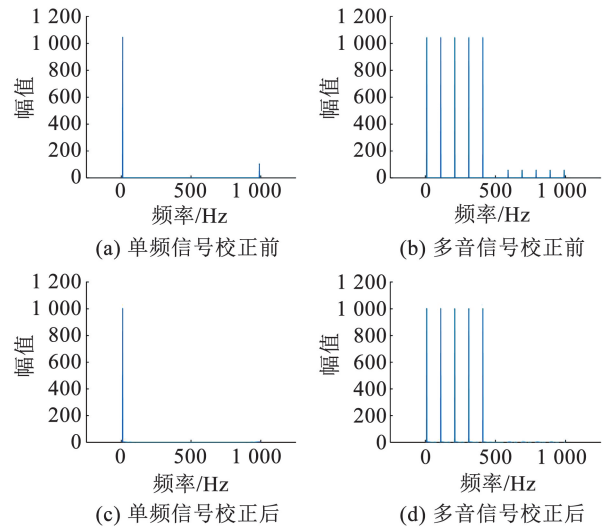
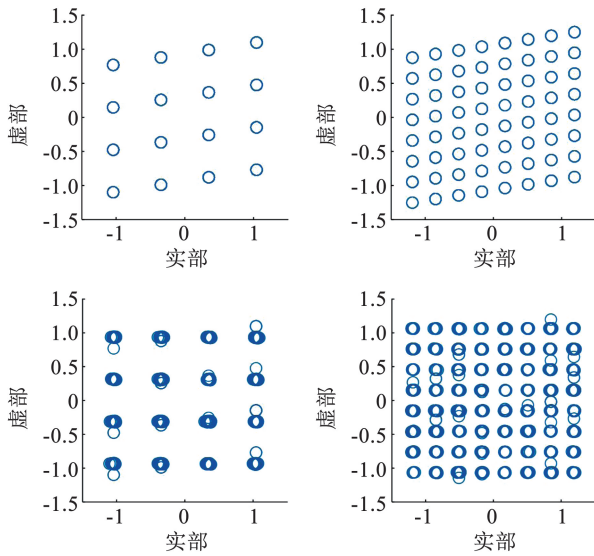


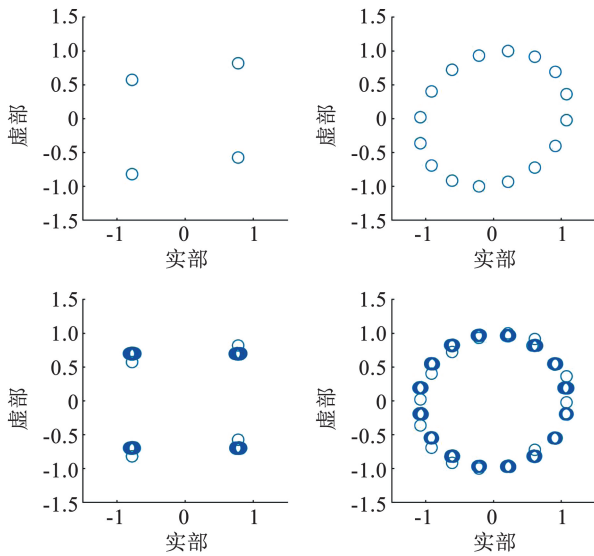
图 6 单频信号和多音信号校正前后的信号频谱图

Fig. 6 Single-tone signal and multi-tone signal spectrum before and after calibration

图 7(a) 为输入 16QAM 和 64QAM 信号时, 校正前后信号的星座图。图 7(b) 为输入 4PSK 和 16PSK 信号时, 校正前后信号的星座图。从两幅图可以看到, 由于 IQ 失配, 校正前的信号点偏离了标准信号的位置, 出现了扭曲。校正后的信号点整体位于理想位置, 说明本文所提出算法的校正效果良好。图中仍存在少量点的偏移, 是由于信号的校正是一个迭代更新的过程, 初始信号点尚未得到理想校正。随着滤波器系数的持续更新, 校正后的信号逐步逼近理想信号。



(a) 16QAM (左) 和64QAM (右) 信号



(b) 4PSK (左) 和16PSK (右) 信号

图 7 校正前后的星座图

Fig. 7 Constellation diagram before and after calibration

为验证过程噪声方差 Q 和观测噪声方差 R 对 Kalman 滤波器校正性能的影响,图 8 给出了输入为单频信号下设置不同噪声方差时信号的 IRR 曲面图。本文算法中参数 R 、 Q 以及二者比值系数 R/Q 是影响算法性能的关键参数。其中, R 为观测噪声方差系数, R 越小,滤波器对观测数据的依赖性更强; Q 为过程噪声方差系数, Q 越大,说明系统状态变化的不确定性更大。从图 8 可以观察到,随着 Q 增大或 R 减小,IRR 显著提升,表明系统的估计精度和校正效果增强。随着 Q 减小或 R 增大,系统预测不稳定或观测数据误差加大,导致 IRR 逐步下降。其中,当 R/Q 比值位于 $[10^{-8}, 10^{-4}]$ 区间时,IRR 可达 44.5 dB,整体处于较高水平。而随着 R/Q 比值进一步增大 ($> 10^{-4}$),滤波器过度依赖预测模型、

忽略测量数据,导致 IRR 明显下降。图 8 结果表明,该算法在较大的参数变化范围内仍能够保持稳定的校正性能,即具有良好的鲁棒性。

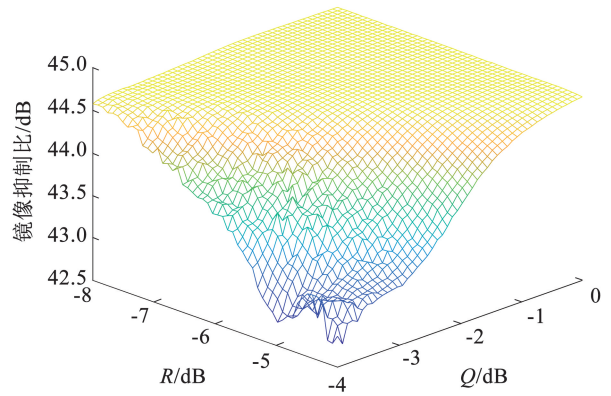
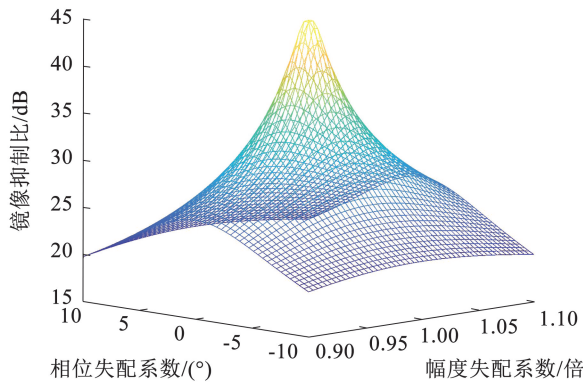


图 8 不同观测噪声方差 R 和过程噪声方差 Q 时的 IRR 曲面图

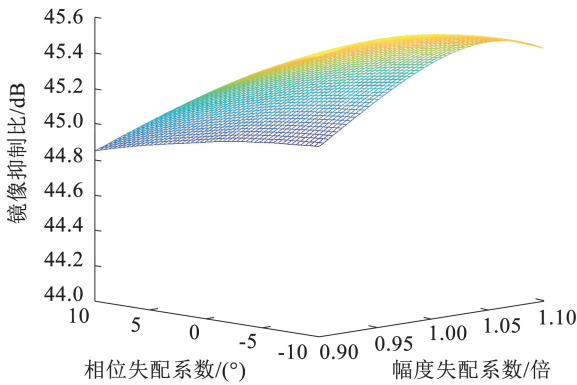
Fig. 8 IRR surface plot under different process and measurement noise variance

为了比较该算法与传统的 LMS 算法、NLMS 算法以及 APA 算法的校正性能,分别绘制几种算法校正后的 IRR 曲面图及 SER、MSE 曲线图。对单频信号,计算不同幅度和相位失配因子下校正后的信号 IRR,比较 4 种算法校正后的镜像信号的抑制情况。对 16QAM 和 16PSK 信号,通过计算在不同信噪比 (signal-to-noise ratio, SNR) 下校正后信号的 SER,比较校正精度。在迭代过程中,利用 MSE 准则计算输出信号与理想信号同向和正交分量上误差的平方和,以对比不同算法的收敛速度。

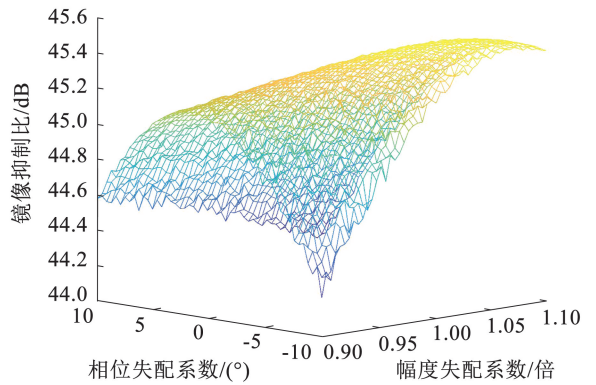
图 9(a)为校正前失配信号的 IRR 曲面图。当失配参数越大时,信号的 IRR 越小,表明信号中存在的干扰信号强度越大。越靠近中心,IRR 越大,最终达到 44.75 dB。图 9(b)为双通道 Kalman 滤波算法校正后信号的 IRR 曲面图,结果显示,当幅度失配系数在 0.9 ~ 1.1 倍、相位失配系数在 $-10^\circ \sim 10^\circ$ 时,IRR 保持在 44.8 ~ 45.6 dB 范围内。校正效果稳定,且曲面平滑。图 9(c)为 LMS 算法校正结果,其 IRR 曲面出现剧烈起伏,可见该算法对失配程度更加敏感。当不平衡度增大时,IRR 下降较为明显,降至 44.2 dB 以下。图 9(d)和(e)分别为 NLMS 和 APA 算法校正结果,二者整体与双通道 Kalman 滤波算法的 IRR 相近。相比 LMS 算法,稳定性有所改善,但 IRR 曲面仍然存在一定波动,相比 Kalman 滤波算法稳定性稍弱。对比 IRR 曲面图得到 4 种算法的 IRR 值均有明显提升,其中双通道 Kalman 滤波算法校正效果最优,具有更好的稳定性。



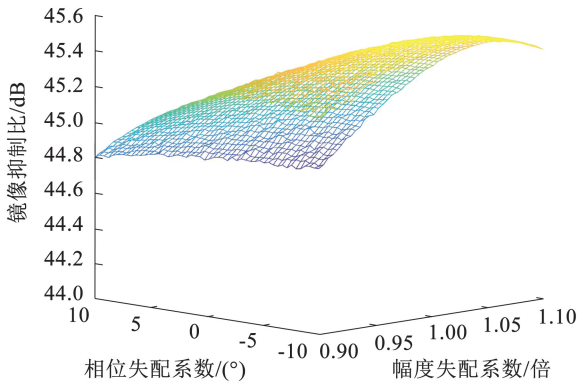
(a) 校正前信号



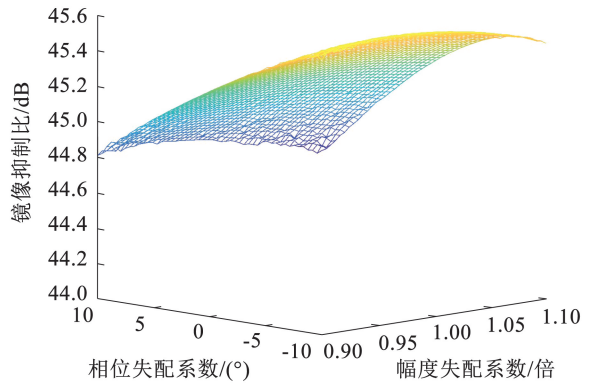
(b) 双通道Kalman滤波算法校正后



(c) LMS算法校正后



(d) NLMS算法校正后



(e) APA算法校正后

图 9 单频信号的 IRR 曲面图

Fig. 9 IRR surface plot of the single-tone signal

图 10 分别给出了 16QAM 和 16PSK 信号在未校正、采用双通道 Kalman 滤波算法、LMS 算法、NLMS 算法以及 APA 算法校正下的 SER 随 SNR 变化的曲线图。仿真中设置幅度不平衡度为 1.2 倍，相位不平衡度为 30°，SNR 范围为 0 ~ 40 dB。从图 10 中可以看出，经过几种算法校正后，信号的 SER 均明显低于未校正情况。但相比于其他算法，

双通道 Kalman 滤波算法在整个 SNR 范围内 SER 最低，表明双通道 Kalman 滤波算法的校正精度最高。此外，当 SNR 为 0 dB 时，信道噪声占主导，SER 接近 0.8。随着 SNR 增大，信道噪声影响逐渐减弱，SER 主要受 IQ 失配影响，曲线趋于平稳，表明所提出的双通道 Kalman 滤波算法在中高 SNR 条件下的优势。

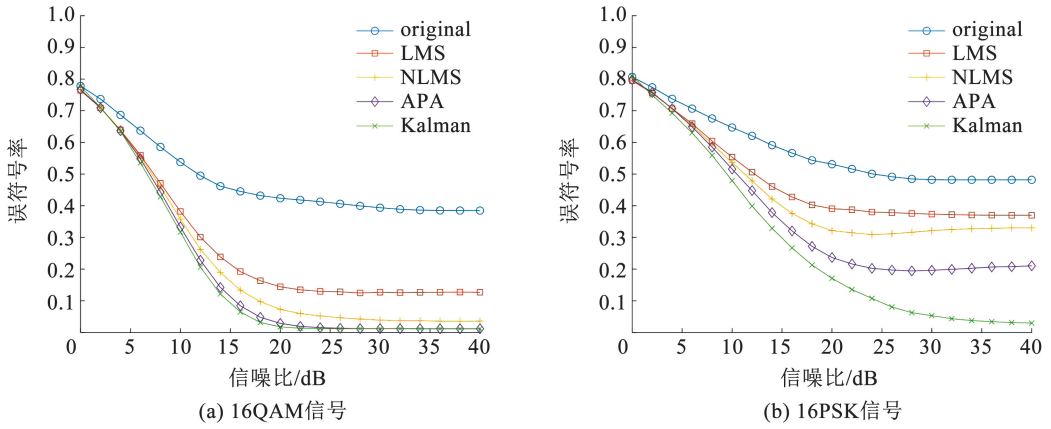


图 10 校正后的 SER 曲线图

Fig. 10 SER plot after calibration

图 11 给出了 4 种算法在迭代过程中的 MSE 曲线图,可以看到,双通道 Kalman 滤波算法在校正过程中具有极快的收敛速度和极低的均方误差波动。在迭代初始阶段(约 50 次),MSE 迅速收敛至稳定状态,且稳定之前振荡较小,表明其具有极强的动态响应能力。相比之下,LMS、NLMS 和 APA 算法分别在约 500、400 和 200 次迭代后收敛至稳定状态,且稳定前存在较大幅度的 MSE 波动,并伴随明显的振荡现象。

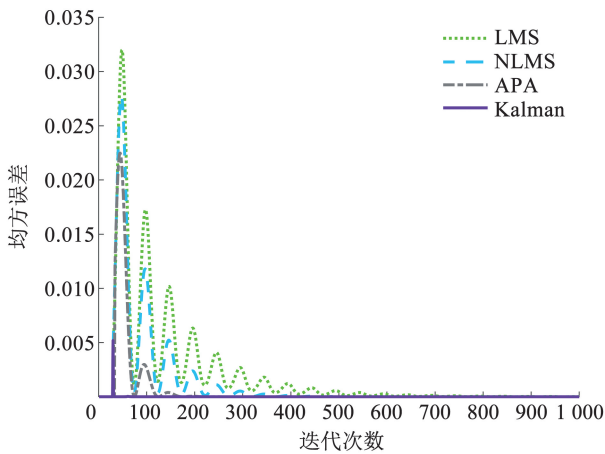


图 11 MSE 迭代曲线图

Fig. 11 MSE plot during interating

为了评估本文所提出的双通道 Kalman 滤波算法的实际应用能力,本文将其与其他 3 种算法在计算复杂度方面进行比较。由于在数字信号处理中,乘法通常为计算复杂度的主要来源,因此在计算复杂度分析中,仅考虑乘法的次数。

4 种算法的计算复杂度结果如表 1 所示。LMS 算法每次迭代大约需要 $4L + 2$ 次乘法运算,其中 L 为滤波器阶数,适合资源有限的场景。对于 NLMS

算法,其在每次迭代中进行归一化处理,整体计算复杂度与 LMS 算法相近,为 $O(L)$ 。APA 算法则在每次更新中引入 M 组历史样本进行联合处理,因此其计算复杂度为 $O(L \times M)$ 。而双通道 Kalman 滤波算法涉及多次矩阵运算,其复杂度为 $O(L^3)$,主要来自于 Kalman 增益计算和协方差矩阵更新部分。尽管本文所提出的算法在计算复杂度方面高于其他几种算法,但其在收敛速度和稳定性方面表现更好,更适用于对校正精度要求较高的通信环境。

表 1 算法计算复杂度对比

Tab. 1 Computational complexity comparison of algorithms

算法	计算复杂度
双通道 Kalman 滤波算法	$O(L^3)$
LMS 算法	$O(L)$
NLMS 算法	$O(L)$
APA 算法	$O(L \times M)$

4 结 语

由于零中频接收机制造工艺的局限性,IQ 两路本振信号和基带链路无法实现完全的幅度相等、相位差 90° ,导致接收机输出信号存在幅度和相位失配问题。为此,本文提出了一种双通道 Kalman 滤波算法,对频率无关 IQ 失配信号进行补偿,并通过仿真验证了该算法的有效性。该算法通过状态空间建模与协方差自适应更新,能够在动态环境下实现更加高效、稳定的参数估计,从而实现 IQ 失配信号的有效校正。仿真结果表明,本文算法校正信号的 IRR 可达 45 dB 以上,且校正后的 IRR 曲面平滑,校正效果稳定。同时,该算法迭代约 50 次时,均方误差收敛至接近于 0,而 LMS 算法及其改进的 NLMS、

APA 算法分别需迭代约 500、400、200 次才能达到收敛。因此,本文所提出的算法在收敛速度和稳定性方面具有明显优势,在高精度要求场景下表现出更强的鲁棒性,具有一定的工程应用潜力。

参考文献

- [1] 张智宣, 李强, 彭辉杰, 等. 基于 SLIPT 的混合可见光/射频协作通信系统性能分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2022, 54(5): 34
ZHANG Zhixuan, LI Qiang, PENG Huijie, et al. Performance analysis of a hybrid VLC/RF cooperative communication system based on SLIPT [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2022, 54(5): 34. DOI:10.11918/202108068
- [2] 王红举. 窄带零中频接收机 IQ 不平衡校准技术研究[J]. 现代导航, 2018, 9(2): 114
WANG Hongju. Research on IQ imbalance calibration technology for narrowband zero intermediate frequency receivers [J]. Modern Navigation, 2018, 9(2): 114. DOI: 10.3969/j.issn.1674-7976.2018.02.007
- [3] SCHOLAND T, JUNG P. Intermediate frequency zero-crossing detection of filtered MSK based on irregular sampling[J]. European Transactions on Telecommunications, 2007, 18(7): 669. DOI:10.1002/ett.1213
- [4] 向景睿, 田书林, 王厚军, 等. 同相正交信号相位失衡补偿方法研究[J]. 电子科技大学学报, 2023, 52(4): 523
XIANG Jingrui, TIAN Shulin, WANG Houjun, et al. Research on phase imbalance compensation method for in-phase quadrature signals[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2023, 52(4): 523. DOI: 10.12178/1001-0548.2022342
- [5] 郭慧民, 阎跃鹏. 零中频接收机的直流偏移消除和自动增益校准[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2022, 49(2): 162
GUO Huimin, YAN Yuepeng. DC offset elimination and automatic gain calibration in zero-IF receivers[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2022, 49(2): 162. DOI: 10.16339/j.cnki.hdxzbk.2022225
- [6] 刘洋. 宽带数字接收机 IQ 不平衡估计与自适应补偿算法[J]. 电讯技术, 2020, 60(5): 550
LIU Yang. IQ imbalance estimation and adaptive compensation algorithm for wideband digital receivers [J]. Telecommunication Technology, 2020, 60(5): 550. DOI: 10.3969/j.issn.1001-893x.2020.05.010
- [7] LIANG J P, CHAI J, CHEN X, et al. Receiver IQ imbalance and skew compensation for high order modulation formats by frequency domain 4×2 MIMO [J]. Journal of Lightwave Technology, 2023, 41(2): 558. DOI: 10.1109/JLT.2022.3219866
- [8] WANG Zhendong, CHEN Xingyu, LIU Chengyun, et al. BER performance analysis of hybrid carrier framework with IQ imbalance compensation [C]// Proceedings of the Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Nanjing, China; IEEE, 2021: 2. DOI:10.1109/WCNC49053.2021.9417263
- [9] VALLANT G, EPP M, SCHLECKER W, SCHNEIDER U, et al. Analog IQ impairments in Zero-IF radar receivers: Analysis, measurements and digital compensation [C]// Proceedings of the International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC). Graz, Austria; IEEE, 2012: 1706. DOI: 10.1109/I2MTC.2012.6229222
- [10] 贾可新, 吴瑞荣. 零中频接收数字阵列镜像抑制的性能分析与方法[J]. 雷达科学与技术, 2024, 22(2): 200
JIA Kexin, WU Ruihong. Performance analysis and methods of image rejection in zero-IF digital array receivers [J]. Radar Science and Technology, 2024, 22(2): 200. DOI: 10.3969/j.issn.1672-2337.2024.02.010
- [11] REN B, TEH K C, AN H Y, et al. OFDM modulation classification using cross-SKNet with blind IQ imbalance and carrier frequency offset compensation [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2024, 73(6): 8389. DOI: 10.1109/tvt.2024.3356606
- [12] 陶毅, 丁丽. 利用共轭对称性的数字 IQ 频域校准方法[J]. 西安电子科技大学学报, 2021, 48(2): 184
TAO Yi, DING Li. Digital IQ frequency domain calibration method using conjugate symmetry [J]. Journal of Xidian University, 2021, 48(2): 184. DOI: 10.19665/j.issn1001-2400.2021.02.023
- [13] DILEK S, TSCHOBAN C. Performance evaluation of E-band transmit-receive front-ends based on characterization of joint effects of IQ imbalance and carrier phase/frequency offset [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2023, 71(5): 2069. DOI: 10.1109/tmtt.2022.3223946
- [14] 王安阳, 黄英, 宋全军. 基于温度自动补偿的直接上变频发射机中正交不平衡校准方案[J]. 传感技术学报, 2022, 35(9): 1211
WANG Anyang, HUANG Ying, SONG Quanjun. Orthogonal imbalance calibration scheme for direct up-conversion transmitters based on temperature automatic compensation [J]. Journal of Sensor Technology, 2022, 35(9): 1211. DOI: 10.3969/j.issn.1004-1699.2022.09.008
- [15] 张睿. 零中频接收机中 OFDM 信号的 IQ 失配的研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2023
ZHANG Rui. Research on IQ mismatch of OFDM signals in zero-intermediate-frequency receivers [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2023. DOI: 10.27005/d.cnki.gdzku.2023.005090
- [16] SANDELL M, TSIMBALO E, JARDAK S, et al. Estimation of wideband IQ imbalance in MIMO OFDM systems with CFO [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(9): 5821. DOI: 10.1109/TWC.2021.3070387
- [17] 曹钰琛, 万建, 陶加祥. 基于统计特征的 IQ 不平衡高效校正算法[J]. 电子器件, 2022, 45(2): 468
CAO Yuchen, WAN Jian, TAO Jiaxiang. High-Efficiency IQ imbalance correction algorithm based on statistical features [J]. Electronic Devices, 2022, 45(2): 468. DOI: 10.3969/j.issn.1005-9490.2022.02.036
- [18] FARUK M S, KIKUCHI K. Compensation for IN-Phase/quadrature imbalance in coherent-receiver front end for optical quadrature amplitude modulation [J]. IEEE Photonics Journal, 2013, 5(2): 7800112. DOI: 10.1109/JPHOT.2013.2251872
- [19] LUO Laiwei, WANG Jun, SONG Jian. A novel blind compensation scheme for I/Q imbalance of wideband zero-IF transmitter [C]// Proceedings of the International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB). Bilbao, Spain; IEEE, 2022: 1. DOI: 10.1109/BMSB55706.2022.9828557

- [20] 姚亚峰, 陈怡铭, 周群群, 等. 改进的统计特性 IQ 不平衡校正算法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2021, 49(11): 12
YAO Yafeng, CHEN Yiming, ZHOU Qunqun, et al. Improved statistical feature-based IQ imbalance correction algorithm [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2021, 49(11): 12. DOI: 10.13245/j.hust.211103
- [21] CHEN Yan, YOU Li, GAO Xiqi, et al. Channel estimation with pilot reuse in IQ imbalanced massive MIMO [J]. IEEE Access, 2020, 8: 1542. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2962211
- [22] PAIREDER T, MOTZ C, KANUMALLI R S, et al. Ultra-low complex blind I/Q-imbalance compensation[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems-I: Regular Papers, 2019, 66(9): 3517. DOI: 10.1109/TCSI.2019.2924285
- [23] OU J, WANG J, PENG Q, et al. Learning-based signal detection for OFDM systems with I/Q imbalance [C]// Proceedings of the 3rd International Conference on Information Communication and Signal Processing (ICICSP). Shanghai, China; IEEE, 2020: 69. DOI: 10.1109/ICICSP50920.2020.9232099
- [24] DENG X, MA Y, ZHANG X J, et al. Convolutional block attention module-based neural network for enhanced IQ imbalance estimation in low signal-to-noise ratio environments [C]// IEEE International Conference on Communications. Denver, CO, USA; IEEE, 2024: 4066. DOI: 10.1109/icc51166.2024.10622606
- [25] TARIGHAT A, SAYED A H. Joint compensation of transmitter and receiver impairments in OFDM systems [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6(1): 240. DOI: 10.1109/TWC.2007.05135
- [26] TARIGHAT A, BAGHERI R, SAYED AH. Compensation schemes and performance analysis of IQ imbalances in OFDM receivers [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2005, 53(8): 3257. DOI: 10.1109/TSP.2005.851156
- [27] CETIN E, KALE I, MORLING RCS. On the performance of a blind source separation based I/Q-corrector [C]// Proceedings of the IEEE Radio and Wireless Conference (RAWCON). Boston, MA, USA; IEEE, 2002: 99. DOI: 10.1109/RAWCON.2002.1030127
- [28] CETIN E, KALE I, MORLING RCS. Joint compensation of IQ imbalance and carrier phase synchronization errors in communication receivers [C]// Proceedings of the IEEE International Symposium on Circuits and Systems. Kobe, Japan; IEEE, 2005(5): 4481. DOI: 10.1109/ISCAS.2005.1465627
- [29] ZEKKARI C, DJENDI M, GUESSOUM A. Efficient adaptive filtering algorithm for IQ imbalance compensation Tx/Rx systems [J]. IET signal processing, 2018, 12(5): 566. DOI: 10.1049/iet-spr.2017.0448
- [30] ZEKKARI C, DJENDI M, GUESSOUM A. A comparative study of adaptive and non-adaptive IQ imbalance compensation methods in RX system [C]// Proceedings of the 6th International Conference on Image and Signal Processing and their Applications (ISPA). Mostaganem, Algeria; IEEE, 2019: 1. DOI: 10.1109/ISPA48434.2019.8966851
- [31] 徐保荣, 王兴成, 张齐, 等. 自适应扩展卡尔曼滤波电池荷电状态估算方法 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2021, 53(7): 96
XU Baorong, WANG Xingcheng, ZHANG Qi, et al. State of charge estimation method for batteries based on adaptive extended Kalman filter [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2021, 53(7): 96. DOI: 10.11918/202006134
- [32] XIANG Q, YANG Y, ZHANG Q, et al. Compensation of IQ imbalance using Kalman filter in coherent optical systems [C]// Proceedings of the 23rd Opto-Electronics and Communications Conference (OECC). Jeju, South Korea; IEEE, 2018: 1. DOI: 10.1109/OECC.2018.8730056
- [33] 贾颖新, 王岩飞. SAR 激励信号正交调制幅相不平衡失真校正方法 [J]. 中国科学院大学学报(中英文), 2024, 41(4): 526
JIA Yingxin, WANG Yanfei. Predistortion correction method for amplitude and phase imbalance in quadrature modulation of SAR excitation signals [J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences (Chinese and English Edition), 2024, 41(4): 526. DOI: 10.7523/j.ucas.2022.079

(编辑 吕雪梅)