

箕舌线变步长 LMS/F 算法数字域自干扰消除研究^{*}

韩宇宸 余志勇 曹俊杰 韩 佳 刘 荣

(火箭军工程大学,西安 710000)

摘 要: 自干扰消除技术是实现带内全双工 (IBFD) 通信的重要前提,其中数字域自干扰消除是带内全双工通信系统中硬件复杂度最低、灵活性最高的自干扰消除技术,并且是自干扰消除的最后一道防线。然而,其消除能力仍需提升,主要是如何处理收敛速度和稳态精度之间的平衡,并且还要具备突变信道的自适应能力。文章提出了一种新的全双工系统的数字自干扰消除方法,发射链路采用数字、模拟预失真技术消除功率放大器的非线性失真,使用辅助接收链获取发射链路信号副本,在数字域中利用重构自干扰信号副本消除接收信号残余自干扰信号和功率放大器残余非线性失真,并通过在接收链与辅助接收链之间共用一个振荡器消除部分接收机相位噪声。仿真表明,该方法与已有变步长 LMS 消除方法相比,在信噪比为 5 dB 的条件下,能够在提高收敛速度的同时获得优于变步长 LMS 方法的消除能力。

关键词: 全双工通信,自干扰消除,变步长 LMS,箕舌线函数

Research on Self-Interference Cancellation in Digital Domain for Variable Step Size LMS/F Algorithm Based on Tongue-Like Curve

HAN Yu-chen, YU Zhi-yong, CAO Jun-jie, HAN Jia, LIU Rong

(Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710000, China)

Abstract: Self-interference cancellation technology is an important prerequisite for the realization of in-band full-duplex (IBFD) communication. Digital domain self-interference cancellation is the least complex self-interference cancellation technology in IBFD communication systems, and is the last line of defense for self-interference cancellation. However, its elimination ability still needs to be improved, mainly how to deal with the balance between convergence speed and steady-state accuracy, and also have the adaptive ability of mutation channel. In this paper, a new digital self-interference cancellation method for full-duplex systems is proposed, in which the transmit chain employs digital and analog predistortion techniques to eliminate nonlinear distortion of the power amplifier, then an auxiliary receive chain is used to obtain a copy of the transmit chain signal, and the reconstructed self-interfering signal copy is used in the digital domain to eliminate the receive signal residual self-interfering signal and power amplifier residual nonlinear distortion, and cancel part of the receiver phase noise by sharing an oscillator between the auxiliary and normal receiver chains. Simulations show that compared with the existing variable-step-size LMS elimination methods, the proposed method can improve the convergence speed and obtain better elimination ability than the existing variable-step-size LMS methods under the condition of a signal-to-noise ratio of 5 dB.

Key words: full-duplex communication, self-interference cancellation, variable-step-size LMS, versoria function

引 言

带内全双工 (IBFD) 通信是一种能够在同一频段上同时发送和接收数据的通信方式,理论上能够使频谱利用率提升一倍。目前限制带内全双工系统

发展的因素是接收端会接收到同侧发送端泄露的自干扰信号,自干扰信号功率通常比期望信号功率大很多,如果不消除自干扰信号会导致接收链路饱和堵塞。例如,在 WiFi 系统中,发射端功率可高达约 20 dBm,典型的接收机底噪约为 -90 dBm,这需要实

^{*} 收稿日期:2022-02-28;修回日期:2022-04-23

基金项目:国家自然科学基金(62071481)

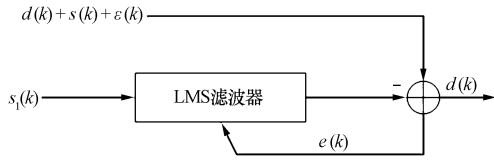


图 2 LMS 自适应滤波

$$e(k) = r(k) - s_1(k)^T w(k) \quad (2)$$

其中 $e(k)$ 为误差信号, $s_1(k)$ 为辅助链路输入滤波器的信号, $w(k)$ 为滤波器权重系数。

利用 LMS 滤波器输出信号 $s_1(k)^T w(k)$ 消去接收信号中的自干扰信号, 差值作为误差信号 $e(k)$ 反馈给 LMS 滤波器, 从而调整滤波器抽头权重系数 $w(k)$ 。通过该过程持续迭代模拟出无线信道脉冲响应 $\hat{h}$, 达到自干扰消除的目的。利用信道估计方法消除数字域自干扰信号的思想是精确出自干扰信道响应 $\hat{h}$ 。

在滤波器设计使用过程中, 通常以均方误差 (MSE) 作为衡量滤波器性能的评价指标, 即均方误差越小则滤波器性能越好。均方误差公式表示如下:

$$\text{MSE} = E[e^2(k)] \quad (3)$$

其中 $E[e^2(k)]$ 是均方误差, 为使滤波器消除的数字域残余自干扰达到最优效果需要在迭代更新中使得 MSE 最小, 需确定权重系数的更新公式, 使 MSE 不断趋于最小值。

权重更新公式为:

$$w(k+1) = w(k) + \mu e(k) s_1(k) \quad (4)$$

其中 μ 为步长因子, 决定了稳态精度和收敛速度。权重系数 $w(k)$ 会在每次迭代后根据反馈信号更新, 通过更新 $w(k)$ 使均方误差逐渐趋于最小, 即 $w(k)$ 无限趋近重构无线信道脉冲响应 $\hat{h}$ 。

然而, LMS 算法在低信噪比 (≤ 5 dB) 条件下稳态精度较低。因此, 在不显著增加计算复杂度的前提下, 在 LMS 算法的基础上提出了最小四阶矩 (least-mean fourth, LMF) 算法^[7]。因为高阶功率滤波器可以有效抑制噪声干扰, 特别是在低信噪比条件下, 所以该算法采用四阶功率优化准则, 而不是 LMS 的平方功率^[8]。LMF 权重系数更新公式为:

$$w(k+1) = w(k) + \mu e^3(k) s_1(k) \quad (5)$$

然而, 由于其权重系数更新方程中的高阶功率优化, 导致 LMF 算法的计算复杂度很高, 这同样为工程

实现增加了复杂度。

2.2 箕舌线 LMS/F 自适应滤波自干扰消除

由文献[9]可知, LMS 算法虽然计算简单, 但是无法实现消除自干扰信号所需的高稳态精度, 并且在信道突变的情况下收敛速度过慢; LMF 算法可以提供较高的稳态精度, 但是计算复杂度较高。为克服两种算法的缺点, LMS/F 作为 LMS 和 LMF 的结合兼具了两种算法的优点^[10]。LMS/F 权重系数更新公式为:

$$w(k+1) = w(k) + \mu \frac{e^2(k)}{e^2(k) + \varepsilon} s_1(k) \quad (6)$$

其中 ε 为阈值参数, 为一正值, 通过选取合适的 ε 值平衡稳态精度和收敛速度。

在 5 dB 信噪比的条件下, 由图 3 可以看出定步长 LMS/F 算法随着选择的步长因子逐步减小, 算法达到的精度不断提高, 同时收敛速度也在逐渐变慢。在 LMS/F 自干扰消除过程中需要权衡稳态精度和收敛速度两个方面, 尽管通过选取不同阈值参数 ε 可以实现不同信噪比条件下的自干扰消除, 但是在实际应用时面临的场景都是复杂多变的, 传统定步长 LMS/F 算法在稳态精度和收敛速度方面的要求是互相矛盾的, 为了更大程度地解决这个矛盾本文提出了基于箕舌线的变步长 LMS/F 算法。

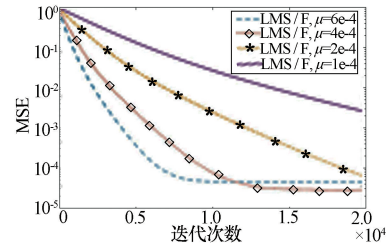


图 3 不同步长下 LMS/F 算法消除性能对比

基于箕舌线的变步长 LMS/F 自适应算法在稳态阶段具有步长小且变化小的特点, 并且不需要进行指数运算, 从而降低了计算的复杂度。相比于归一化最小均方 (NLMS) 算法, 在具有相同稳态精度的前提下具备更快的收敛速度, 能够很好地解决固定步长 LMS/F 算法带来的矛盾^[11]。箕舌线函数作为步长调整模型在算法初期提供大步长以提高收敛速度, 在算法即将收敛时提供小步长以提高稳态精度。因此箕舌线函数步长调整模型能够显著提高收敛速度和稳态精度的平衡, 并且通过引入函数的调整参数能更为有效地控制补偿大小^[12]。

因此本文对 LMS/F 加以改进, 采用基于箕舌线函数的变步长 LMS/F 算法, 通过递推次数迭代步长使其能够具有更强的自适应能力。

在定步长 LMS/F 基础上,其步长因子 μ 的更新公式为:

$$\mu(k) = \beta \left(1 - \frac{1}{\alpha [e(k)e(k-1) + 1]} \right) \quad (7)$$

其中 $\beta \leq \frac{1}{\lambda_{\max}}$, $\lambda_{\max}$ 是输入信号自相关矩阵的最大特征值, α 为步长调整因子,可视情调整。通过利用箕舌线变步长 LMS/F 算法可以在数字域实现高稳态精度和高收敛速度的自干扰消除。

3 实验仿真

本节通过对比传统箕舌线 LMS 算法和改进箕舌线迭代变步长 LMS/F 算法在数字域自干扰消除中的均方偏差 (MSD), 对算法性能进行评估。

$$\text{MSD}[w(k)] = E[\|w(k) - w\|_2^2] \quad (8)$$

其中 $w(k)$ 为第 k 个滤波器权重系数。

得到自干扰消除效果如图 4、图 5 所示。

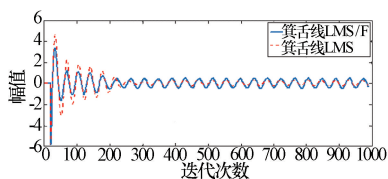


图 4 误差对比

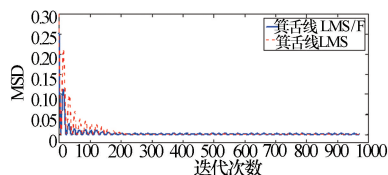


图 5 均方偏差对比

通过观察箕舌线变步长 LMS 与箕舌线变步长 LMS/F 算法误差信号曲线和均方误差信号曲线,不难看出箕舌线变步长 LMS/F 无论是精度还是收敛速度都要优于箕舌线变步长 LMS。图 6 所示为在相同步长不同信噪比下自干扰消除对比,可以看出信噪比 5 dB 相比 25 dB 均方偏差更小,说明箕舌线变步长 LMS/F 算法在低信噪比条件下具有更好的消除效果。

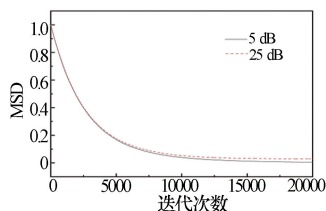


图 6 相同步长不同信噪比下消除对比

4 结论

本文针对 IBFD 数字域自干扰消除问题,提出了一种基于箕舌线函数的变步长 LMS/F 算法消除残余自干扰方法,通过递推次数迭代控制 LMS/F 算法步长因子大小,能够做到有效提高收敛速度的同时兼具高稳态精度,可以有效消除残余自干扰信号。由于保持了 LMS 算法计算复杂度低的优点,因此有利于数字硬件实现,具有较高的实际应用价值。

本文通过使用数/模混合预失真技术消除了发射链路非线性失真,后续接收链路中由 LNA 及 ADC 器件引入的非线性失真仍是未来研究的重难点问题。

参考文献

- [1] Kolodziej K E, Perry B T, Herd J S. In-band full-duplex technology: techniques and systems survey [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2019, 67(7): 3025-3041
- [2] 刘建成, 全厚德, 赵宏志, 等. 基于迭代变步长 LMS 的数字域自干扰对消[J]. 电子学报, 2016, 44(7): 1530-1538
Liu J C, Quan H D, Zhao H Z, et al. Digital self-interference cancellation based on iterative variable step-size LMS[J]. Acta Electronica Sinica, 2016, 44(7): 1530-1538
- [3] Sun Z Y, Zhao Y J. A novel self-interference cancellation method using an optimized LMS algorithm in CCFD systems for a 5G communication network[J]. Applied Sciences, 2019, 9(16): 3308
- [4] Knox M E. Single antenna full duplex communications using a common carrier[A]. WAMICON 2012 IEEE Wireless & Microwave Technology Conference [C], Cocoa Beach, USA, 2012
- [5] Ahmed E, Eltawil A M. All-digital self-interference cancellation technique for full-duplex systems [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(7): 3519-3532
- [6] 周俊宇, 许高明, 韩栋, 等. 基于数/模混合预失真技术的功放线性化[J]. 微波学报, 2022, 38(2): 91-94
Zhou J Y, Xu G M, Han D, et al. Linearization of power amplifier based on digital/analog hybrid predistortion technology[J]. Journal of Microwaves, 2022, 38(2): 91-94
- [7] Walach E, Widrow B. The least mean fourth (LMF) adaptive algorithm and its family[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1984, 30(2): 275-283

(下转第 84 页)

4 结论

本文提出了一种基于横向 GaN 肖特基二极管作为整流的大功率高线性限幅器,产品尺寸 $9\text{ mm} \times 9\text{ mm} \times 2\text{ mm}$,表贴封装。在 $0.03 \sim 1\text{ GHz}$ 频带范围内,开启电平大于 17 dBm ,泄露功率小于 23 dBm ,可承受超过 100 W 连续波的功率。其插入损耗小于 1 dB ,驻波小于 1.6 ,在大动态接收机及其它电子对抗系统中具有较高的应用价值。

参考文献

- [1] 王乔楠,王生明,邓世雄. PIN 二极管限幅器线性度探究[J]. 固体电子学研究与进展, 2021, 41(5): 365-369, 387
Wang Q N, Wang S M, Deng S X. Research on linearity of PIN diode limiter[J]. Research & Progress of SSE, 2021, 41(5): 365-369, 387
 - [2] 邓世雄,高长征,陈书宾. 线性限幅器的设计与研究[J]. 微波学报, 2020, 36(3): 97-100
Deng S X, Gao C Z, Chen S B. Design and research of linear limiters [J]. Journal of Microwaves, 2020, 36(3): 97-100
 - [3] Deng S X, Gao C Z, Chen S B. Research on linearity improvement of silicon-based p-i-n diode limiters [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2020, 30(1): 62-65
 - [4] Zang T, Zhang J, Zhou H, et al. A $1.9\text{-kV}/2.61\text{-m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ lateral GaN Schottky barrier diode on silicon substrate with tungsten anode and low turn-on voltage of 0.35 V [J]. IEEE Electron Device Letters, 2018, 39(10): 1548-1551
 - [5] Dang K, Zhang J, Zhou H, et al. Lateral GaN Schottky barrier diode for wireless high power transfer application with high RF/DC conversion efficiency: from circuit construction and device technologies to system demonstration [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(8): 6597-6606
 - [6] Dang K, Zhang J, Zhou H, et al. A 5.8 GHz high-power and high-efficiency rectifier circuit with lateral GaN Schottky diode for wireless power transfer [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(3): 2247-2252
 - [7] Sun Y, Kang X W, Deng S X, et al. First demonstration of L-band high-power limiter with GaN Schottky barrier diodes (SBDs) based on steep-mesa technology[J]. Electronics, 2021, 10: 433
 - [8] 张瑶. 基于 GaN 肖特基二极管的微波限幅电路设计研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020
Zhang Y. Study on the design of microwave limit circuit based on GaN Schottky diode[D]. Xi'an: Xidian University, 2020
 - [9] White J F. 微波半导体控制电路[M]. 王晦光, 黎安尧, 译. 北京: 科学出版社, 1983. 48-52, 245-313
White J F. Microwave semiconductor control circuit[M]. Wang H G, Li A Y, Translation. Beijing: Science Press, 1983. 48-52, 245-313
 - [10] Bahl I J. Control components using Si, GaAs, and GaN technologies[M]. Boston: Artech House, 2014. 254-286
- 邓世雄 男,1988 年生,博士生,高工。主要研究方向:电磁防护及微波集成电路。
- 刘继斌(通信作者) 男,1974 年生,教授。主要研究方向:电磁兼容与防护。
E-mail: liujibin@nudt.edu.cn
-
- (上接第 80 页)
- [8] Zhang S, Zhang J. New steady-state analysis results of variable step-size LMS algorithm with different noise distributions[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2014, 21(6): 653-657
 - [9] Liu J, Quan H, Li Z, et al. Digital nonlinear self-interference cancellation based on LMS-volterra algorithm [A]. 2016 3rd International Conference on Information Science and Control Engineering (ICISCE) [C], Beijing, China, 2016
 - [10] Gui G, Peng W, Adachi F. Adaptive system identification using robust LMS/F algorithm [J]. International Journal of Communication Systems, 2014, 27(11): 2956-2963
 - [11] 邓江波,侯新国,吴正国. 基于箕舌线的变步长 LMS 自适应算法[J]. 数据采集与处理, 2004(3): 282-285
Deng J B, Hou G X, Wu Z G. Variable step adaptive filtering LMS algorithm based on tongue-like curve [J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2004(3): 282-285
 - [12] Huang F, Zhang J, Sheng Z. Maximum versoria criterion-based robust adaptive filtering algorithm [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2017, 64(10): 1252-1256
- 韩宇宸 男,1997 年生,硕士生。主要研究方向:全双工通信自干扰消除理论与技术研究。
E-mail: 97376875@qq.com