

文章编号: 1001 - 893X(2012)06 - 0928 - 05

一种改进的数字同频直放站自适应反馈干扰抑制算法*

王 飞

(成都工业学院 通信工程系, 成都 611730)

摘 要: 基于数字地面电视广播(Digital Terrestrial Television Broadcasting, DTTB)同频直放站的回波干扰抑制, 提出了一种变步长块 LMS(Variable Step - size Block Normalized Least Mean Square, VSSBNLMS) 自适应算法。此算法的目的是为了提高传统回波干扰抑制的自适应算法的收敛速度和降低计算复杂度。其将输入信号分为长度相等的块, 在每一个数据块内, 权值向量只更新一次, 有效地降低了计算复杂度。另外, 该算法通过输出误差控制更新步长的变化, 与传统的归一化 LMS (NLMS) 和块 LMS (BLMS) 算法相比, 提高了收敛速度。仿真结果表明, 该算法具有良好的收敛速度和回波干扰抑制性能。
关键词: 数字地面电视广播; 同频直放站; 回波干扰抑制; 自适应滤波; 变步长 LMS 算法

中图分类号: TN911.72 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2012.06.019

An Improved Adaptive Feedback Interference Cancellation Algorithm for Digital On-channel Repeaters

WANG Fei

(Department of Communication Engineering, Chengdu Technological University, Chengdu 611730, China)

Abstract: A variable step - size block normalized least mean square (VSSBNLMS) algorithm is derived to cancel the feedback interference in a Digital On - Channel Repeater (DOCR) for the Digital Terrestrial Television Broadcasting (DTTB) networks. Its purpose is to improve the conventional adaptive algorithm's convergence speed and decrease the computational complexity for the feedback interference cancellation. By dividing the input signal into blocks with the same length and updating the tap weights once per every block, the computational complexity can be decreased effectively. Furthermore, variable step - size is applied to increase the convergence speed. Compared with the NLMS and BLMS algorithms, VSSBNLMS algorithm achieves more rapid convergence. Simulations illustrate the computational complexity is reduced and the echo interference cancellation performance is satisfying.

Key words: DTTB; co - channel repeater; echo interference cancellation; adaptive filtering; VSSBNLMS algorithm

1 引 言

无线同频直放站能有效提高信号覆盖范围和减少盲区, 与基站相比, 其最大的优点是节省成本和安装灵活, 提高整个通信网的工作效率。无线同频直放站已广泛应用于数字地面电视广播单频网, 它将基站接收信号放大后再转发出去, 但是由于其收发

天线之间的耦合, 部分转发信号会返回接收天线形成回波干扰, 并与基站信号一同被接收。此时, 如果直放站增益大于收发天线间的隔离度, 回波干扰信号将在直放站与回波信道组成的回路中被循环放大, 导致系统自激; 即使直放站增益小于收发天线间的隔离度, 系统不产生自激, 回波干扰也将影响通信质量。

* 收稿日期: 2012 - 03 - 31; 修回日期: 2012 - 05 - 08

为抑制回波干扰和降低自激风险,目前大多在数字基带采用回波干扰抑制(Interference Cancellation System, ICS)的方法,即在直放站中安装回波抵消器,在时域估计回波信道和回波干扰,然后从接收信号中减去回波估计值。回波抵消器一般由信道估计器、有限冲激响应(Finite Impulse Response, FIR)滤波器和减法器组成,回波信道估计是回波抵消的关键,自适应算法被广泛用来解决回波信道和干扰估计。最小均方(Least Mean Square, LMS)算法由于其结构简单、稳定性好、易于实时实现等优点,在回波抵消中被广泛采用。文献[1-4]采用传统的 LMS 算法进行回波干扰抑制,但 LMS 算法收敛速度较慢,在回波抑制初期系统中仍存在较大的残留回波,从而增加了自激的风险;文献[5]采用自适应格型滤波,有效提高了收敛速度,但同时增加了计算复杂度,不利于硬件实现。另外,文献[6]在直放站中插入一定长度的训练序列对回波信道进行估计,此训练序列功率应保证尽量小,且应周期性地加入以保证信道估计的实时更新。虽然文献[6]仿真表明了此算法的有效性,但训练序列的加入带来的干扰仍不可避免。

结合变步长 LMS(Variable Step-size LMS Algorithm, VSSLMS)算法^[7]和块归一化 LMS(Block Normalized LMS, BNLMS)算法^[8],本文提出了一种改进的变步长块归一化 LMS(Variable Step-size Block Normalized LMS Algorithm, VSSBNLMS)算法用于回波干扰抑制,此算法继承了 VSSLMS 和 BNLMS 两种算法的优点,既获得了较快的收敛性能,又一定程度上节省了计算复杂度。

2 直放站回波干扰抑制系统模型

图 1 是具有自适应回波抵消功能直放站的基带系统模型。

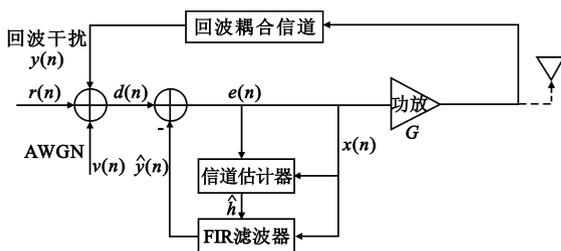


图 1 系统模型
Fig.1 System model

真实回波信道(包含功放)采用 FIR 滤波器建模,其可表示为

$$\mathbf{h} = [h_0, h_2, \dots, h_{N-1}]^T \quad (1)$$

式中, N 为真实信道阶数, $[\cdot]^T$ 表示转置。

回波信道估计向量可表示为

$$\hat{\mathbf{h}}(n) = [\hat{h}_0(n), \hat{h}_1(n), \dots, \hat{h}_{L-1}(n)]^T \quad (2)$$

式中, L 为信道估计的阶数, n 表示离散时间。

n 时刻接收端接收到的总信号为

$$d(n) = r(n) + y(n) + v(n) = r(n) + \mathbf{h}^H \mathbf{x}(n) + v(n) \quad (3)$$

式中, $\mathbf{x}(n) = [x(n), x(n-1), \dots, x(n-N+1)]^T$, $y(n)$ 为回波干扰, $r(n)$ 为接收到的来自基站的电视信号, $v(n)$ 为加性白噪声, 其均值都为 0, 方差分别为 σ_r^2 和 σ_v^2 。

从系统接收总信号中减去回波干扰估计值, 即回波抵消后, 可得误差信号

$$e(n) = d(n) - \hat{y}(n) = r(n) + \mathbf{h}^H \mathbf{x}(n) - \hat{\mathbf{h}}^H(n) \mathbf{x}_L(n) + v(n) \quad (4)$$

式中, $\mathbf{x}_L(n) = [x(n), x(n-1), \dots, x(n-L+1)]^T$ 为 FIR 滤波器的输入信号, 它由误差信号反馈回滤波器而形成, $\hat{y}(n)$ 为回波干扰估计。

信道估计根据 LMS 算法更新, 即

$$\hat{\mathbf{h}}(n+1) = \hat{\mathbf{h}}(n) + \mu \mathbf{x}_L(n) e^*(n) \quad (5)$$

式中, μ 是 LMS 算法的步长。

3 回波干扰抑制 VSSLMS 和 BNLMS 算法

3.1 VSSLMS 算法

回波干扰抑制除了采用 LMS 算法, 还可以采用另外的自适应算法。为了提高信道估计的收敛速度, 可采用变步长 LMS 算法。

变步长的算法的权值更新公式为

$$\hat{\mathbf{h}}(n+1) = \hat{\mathbf{h}}(n) + \mu(n) e^*(n) \mathbf{x}(n) \quad (6)$$

步长是根据输出误差来调整的, 其更新公式为

$$\mu(n+1) = \begin{cases} \mu_{\min}, & \hat{\mu}(n+1) < \mu_{\min} \\ \mu_{\max}, & \hat{\mu}(n+1) > \mu_{\max} \\ \hat{\mu}(n+1), & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

其中:

$$\hat{\mu}(n+1) = \alpha \mu(n) + \frac{\gamma}{N} \sum_{k=n-N+1}^n |e(k)|^2$$

式中, $0 < \alpha < 1$, $\gamma > 0$, μ_{\max} 和 μ_{\min} 分别是最大步长

和最小步长。为了满足算法初始时期有较快的收敛速度, μ_{\max} 一般选择靠近 1, μ_{\min} 选择较小以满足算法的最小均方误差。算法的初始步长设置为 μ_{\max} 。

这种算法比固定步长 LMS 具有更可取的优越性: 自适应初始阶段, $e(n)$ 较大, 对应 $\mu(n)$ 较大, 算法收敛速度较快; 随着算法逐渐进入稳态, $e(n)$ 减小, 对应 $\mu(n)$ 减小, 因此在最佳权系数附近产生较小的失调。

3.2 BNLMs 算法

为了提高 LMS 在回波抵消中的计算复杂度, 可采用时域块归一化 LMS (BNLMS) 算法降低计算量。时域块归一化 LMS 算法的基本思想是把输入参考信号分为长度相等的块, 在每一个数据块内, 权值向量只更新一次, 即 NLMS 算法的更新方程只作用一次。这样就大大节省了计算量, 但是却以降低算法的收敛速度为代价。

假设块 NLMS 算法中每个数据块包含 N 个采样值, 则经回波抵消的误差信号可表示为

$$e(kN+i) = z(kN+i) - \hat{\mathbf{h}}^H(k)\mathbf{x}(kN+i), \quad i = 0, 1, \dots, N-1 \quad (8)$$

式中, N 为数据块长度, k 为数据块序号。式(8)表示在采样时刻 n 回波抵消后的误差信号,

$$n = kN + i, i = 0, 1, \dots, N-1; k = 1, 2, \dots \quad (9)$$

在一数据块中, 算法的收敛性基本由输出的最大误差值决定, 而其他较小的误差值由于包含的信息较少, 可以忽略, 则在一个数据块中算法权值更新的时刻由下式决定:

$$i_u = \operatorname{argmax}_{i \in \{0, \dots, N-1\}} |e(kN+i)| \quad (10)$$

那么算法的更新方程为

$$\hat{\mathbf{h}}(k+1) = \hat{\mathbf{h}}(k) + \mu \frac{e^*(kN+i_u)\mathbf{x}(kN+i_u)}{\|\mathbf{x}(kN+i_u)\|^2 + \epsilon} \quad (11)$$

式中, μ 为步长因子; ϵ 为规则因子, 防止输入信号过小而引起的算法不稳定; i_u 为一数据块内算法更新时刻; $\mu(k)$ 为变步长, 每一数据块步长调整一次。

4 VSSBNLMS 算法

变步长 LMS 算法拥有收敛速度快但计算量相对较大的特点, 而块 NLMS 算法计算量较小但收敛速度较慢。根据这两种算法各自的特点, 下面介绍一种适用于回波抵消的变步长块 NLMS 算法, 此算法综合了前两种算法的优点, 可在提高收敛速度的

同时减少计算量, 其算法流程如图 2 所示。

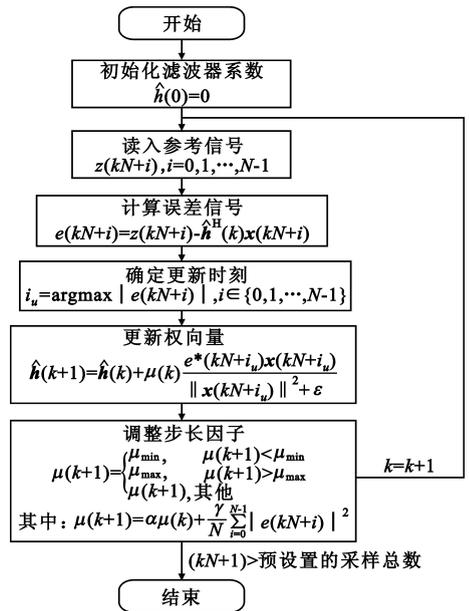


图 2 算法流程
Fig. 2 Flowchart of algorithm

首先将自适应滤波器权系数初始值设置为 0。假设块 NLMS 算法中每个数据块包含 N 个采样值, 则经回波抵消的误差信号如式(8)所示。

步长根据输出误差来调整, 其更新公式为

$$\mu(k+1) = \begin{cases} \mu_{\min}, & \hat{\mu}(k+1) < \mu_{\min} \\ \mu_{\max}, & \hat{\mu}(k+1) > \mu_{\max} \\ \hat{\mu}(k+1), & \text{其他} \end{cases} \quad (12)$$

其中 $\hat{\mu}(k+1) = \alpha\mu(k) + \frac{\gamma}{N} \sum_{i=0}^{N-1} |e(kN+i)|^2$, 其他参数的设置规则与式(7)的设置规则相同。

5 仿真实验

仿真实验中将提出的 VSSBNLMS 算法与 NLMS 和 BNLMS 算法作比较, 考察此算法的性能和相比于另两种算法的优势。采用基于中国 DTTB 标准的数字电视信号^[9], 其调制方式为 TSD-OFDM(时间同步-正交频分复用), 帧头模式采用 PN420, 其带宽为 7.56 MHz, 采样频率 30 MHz; 回波信道模型采用文献[5]提到的 COST207 RA6 信道模型, 如表 1 所示。多普勒频移为 0 Hz, 信道实际阶数 $N = 16$ 。直放站系统增益为 60 dB, 收发天线的隔离度为 55 dB。其他仿真参数如表 2 所示。所有仿真结果都由 100 次蒙特卡罗实验平均获得。

表 1 RA6 COST207 信道参数
Table 1 RA6 COST207 channel parameters

功率分布/dB	延迟/ns
0	0
-4	100
-8	200
-12	300
-16	400
-20	500

表 2 仿真参数
Table 2 Simulation parameters

仿真参数	取值
μ	0.01
μ_{\min}	0.01
μ_{\max}	0.4
α	0.97
γ	0.001
ϵ	0.001
N	4
L	16

将基站至直放站简化为加性高斯白噪信道,则在直放站接收天线端的信噪比(SNR)定义为

$$S = 10 \times \lg \frac{\sigma_r^2}{\sigma_v^2} \quad (13)$$

采用系统归一化残留回波功率(Normalized Residual Echo Power, REP)考察算法的回波干扰抑制性能。系统归一化残留回波定义为

$$R(n) = 10 \lg \left(\frac{\sum_{m=0}^{M-1} |e(n-m) - r(n-m)|^2}{\sum_{m=0}^{M-1} |r(n-m)|^2} \right) \quad (14)$$

式中, M 表示计算 REP 的时间跨度,仿真中取 $M = 1000$ 。REP 可评价回波抵消器回波抑制性能,其值越小,表明回波抑制性能越好。当 LMS 算法收敛后,REP 相当于算法额外均方误差(高信噪比下可忽略掉噪声的影响)。

归一化均方偏差(Normalized Mean Square Deviation, NMSD) 用来考察算法的信道估计性能,其值越小,表明信道估计越准确,其定义为

$$D(n) = 10 \lg (\| \hat{\mathbf{h}}(k) - \mathbf{h} \|^2 / \| \mathbf{h} \|^2) \quad (15)$$

图 3 表示 3 种算法的回波信道估计 NMSD 曲线。NLMS 算法和 BNLMS 算法的步长都设置为

0.01, 而 VSSBNLMS 算法的初始步长设置为 0.01。从图中可以看出,由于 VSSBNLMS 算法采用变步长因子,其收敛速度快于另两种算法;对于 BNLMS 算法,由于其权向量每隔一个数据块才更新一次,其收敛速度最慢。

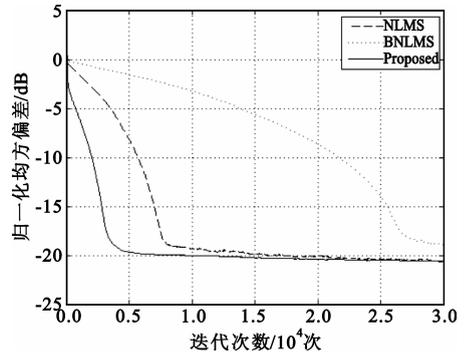


图 3 NMSD 学习曲线
Fig. 3 NMSD learning curves

图 4 表示 3 种算法的回波抵消性能。从图中可以看出,3 种算法用于回波干扰抑制后,最终的残留回波 REP 都可达到 -25 dB 以下,表明 3 种算法都能有效地抑制直放站回波干扰。尽管如此,VSSBNLMS 算法由于采取了变步长因子,其收敛速度明显提高,相比于其他两种算法,其 REP 最先达到 -25 dB 以下,这样就更有效地减小了在回波抵消初期系统的回波干扰,降低了直放站自激的可能。

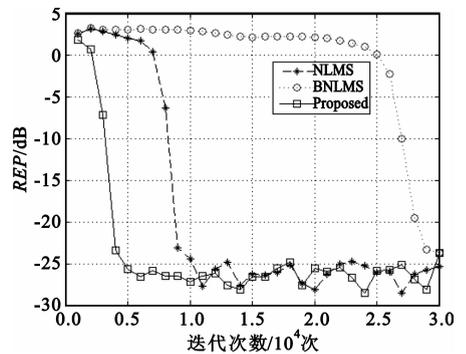


图 4 残留回波 (REP) 曲线
Fig. 4 Residual echo power curves

图 5 为直放站回波抑制前后功率谱密度的对比,采用 VSSBNLMS 算法进行回波抑制。从图中可见,经 VSSBNLMS 算法回波抑制后,带内 15 dB 左右的回波基本被消除,而带外还有少许未抑制的回波干扰,可设计合适的滤波器将其抑制,因此该算法能有效地完成回波抑制功能。

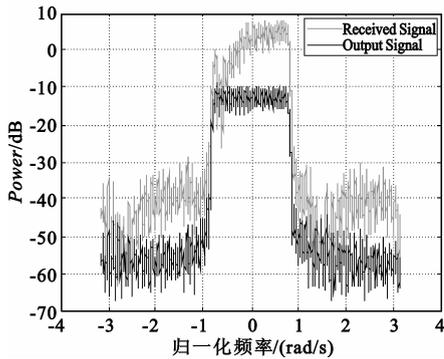


图5 输入输出信号功率谱比较

Fig.5 Comparison of input and output power spectral density

6 结束语

本文在数字地面电视同频直放站回波干扰抑制背景下,提出了一种改进的 VSSBNLMS 自适应算法。此算法将变步长 NLMS 算法和块 LMS 算法相结合,将输入信号分为长度相等的块,在每一个数据块内,权值向量只更新一次,同时通过输出误差控制更新步长的变化。与传统的 NLMS 算法相比,该算法提高了收敛速度并降低了计算复杂度。仿真结果表明,该算法具有良好回波干扰抑制性能,能有效地应用于工程实现中。

参考文献:

- [1] Salehian K, Guillet M, Caron B, et al. On - Channel Repeater for Digital Television Broadcasting Service [J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2002, 48(2): 97 - 102.
- [2] Lee Y T, Park S I, Eum H M, et al. A Design of Equalization Digital On - Channel Repeater for Single Frequency Network ATSC System[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2007, 53(1): 23 - 37.
- [3] Lee M, Keum B, SHIM Y S, Lee H S. An Interference Can-

cellation Scheme for Mobile Communication Radio Repeaters [J]. IEICE Transactions on Communication, 2009, E92 - B (5): 1778 - 1785.

- [4] Lee M, Keum B K, Lee H S, et al. A Radio Interference Cancellation Model for Mobile Communication Systems[C]// Proceedings of the 4th IEEE International Conference on Wireless and Mobile Communications. Tokyo, DC: IEEE, 2008: 376 - 381.
- [5] Choi J Y, Hong J K, Lee S J. An Interference Cancellation for Digital On - Channel Repeaters in T - DMB System [C]// Proceedings of IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting. Washington, DC: IEEE, 2009: 317 - 321.
- [6] Nasr K M, Cosmas J P, Bard M, et al. Performance of an Echo Canceller and Channel Estimator for On - Channel Repeaters in DVB - T/H Networks[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2007, 53(3): 609 - 618.
- [7] Kwong R H, Johnston E W. A Variable Step Size LMS algorithm[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1992, 40 (7): 1633 - 1642.
- [8] Haykin S. Adaptive Filter Theory[M]. 4th ed. NJ: Prentice - Hall, 2002: 273 - 277.
- [9] Zhang W, Guan Y, Liang W, et al. An introduction of the Chinese DTTB standard and analysis of the PN595 working modes[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2007, 53 (1): 8 - 13.

作者简介:

王 飞(1978—),男,四川南充人,2002年于南京航空航天大学获学士学位,2006年于四川大学获硕士学位,现为讲师,主要研究领域为信号处理。

WANG Fei was born in Nanchong, Sichuan Province, in 1978. He received the B.S degree from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics and the M.S. degree from Sichuan University in 2002 and 2006, respectively. He is now a lecturer. His research concerns signal processing.

Email: qifly@126.com