

LMS 自适应干扰消除在基于人工干扰的物理层安全通信系统中的应用研究

彭磊 臧国珍 高媛媛 沙楠 奚晨婧 蒋炫佑

(陆军工程大学通信工程学院 南京 210007)

摘要 针对外部窃听者对无线通信系统中的信息传输带来的安全威胁,首先提出了一种由源节点在发送源信息的同时发送人工干扰信号的安全传输方案。为有效消除人工干扰信号对合法目的端正确恢复源信息的影响,提出将 LMS 自适应算法应用于对接收信号中人工干扰信号的估计与消除。为检验所提方案的效果,文中以 QPSK 调制系统为例,专门设计了一种简单易行的人工干扰信号。通过对系统误比特率进行 MATLAB 仿真,验证了所提方案的有效性,并得到了所提方案中 LMS 自适应算法的最优步长因子和滤波器阶数。

关键词 物理层安全,人工干扰,干扰消除,LMS 算法,误比特率

中图分类号 TN918.91 文献标识码 A DOI 10.11896/j.issn.1002-137X.2019.06.025

Research and Application of LMS Adaptive Interference Cancellation in Physical Layer Security Communication System Based on Artificial Interference

PENG Lei ZANG Guo-zhen GAO Yuan-yuan SHA Nan XI Chen-jing JIANG Xuan-you

(College of Communications Engineering, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, China)

Abstract Regarding to the security threat of information transmission brought by external eavesdropper in wireless communication system, this paper proposed a secure transmission scheme that source node sends source information and artificial interference simultaneously. To effectively eliminate the impact of artificial interference signal on the correct recovery of source information, the LMS adaptive algorithm was applied to estimate and eliminate the artificial interference signal. To verify the effectiveness of the proposed scheme, the QPSK modulation system was taken as an example, and a simple artificial interference signal was designed. Through the MATLAB simulation of the bit error rate of the system, the effectiveness of the proposed scheme is verified, and the optimal step size and filter order of the LMS adaptive algorithm in the proposed scheme are obtained.

Keywords Physical layer security, Artificial interference, Interference cancellation, LMS algorithm, Bit error rate

1 引言

无线信道的开放性使得无线通信中的信息传输面临着严重的安全威胁,上层数据加密方法是解决这一问题的传统手段。然而,近年来,基于无线信道特征的物理层安全技术作为传统数据加密技术的有益补充,得到了广泛关注。Wyner 于 1975 年首次建立了窃听信道模型,并证明当主信道条件比窃听信道条件好(即安全容量为正)时,一定会存在一种编码方式可以实现信息的安全传输^[1]。鉴于此,有关物理层安全的许多工作都是研究如何利用不同技术手段来不断提高信息传输的安全容量^[2-5]。人工干扰(Artificial Interference, AI)是目前研究中用来提高系统安全容量的一种常用方法,其基本思想是通过发送合法目的端已知的人工干扰信号,使其对窃

听者的干扰大于对合法目的端的干扰,从而达到提高系统信息传输安全性能的目的。文献[6]给出了一种由源节点发送人工干扰信号的安全通信方案,为了使系统获得最佳的安全性能,该方案还对系统的总发送功率进行了优化分配;文献[7]针对窃听信道状态信息是否已知,分别提出了两种由目的端发送人工干扰信号的干扰实施方案。人工干扰技术凭借其在增强无线通信信息传输安全性能方面的优异性能,得到了业界的广泛关注和研究。然而,分析现有研究不难发现,目前关于人工干扰的相关研究很少考虑人工干扰信号的具体形式^[8],而且多数都是以假设合法目的端能完全消除人工干扰信号、合法通信信道质量不受影响为前提的。然而实际上,即便合法目的端已知发送的人工干扰信号,一旦干扰信号被送入信道,无线信道的随机变化都会给其引入一定的不确定性,

到稿日期:2018-05-01 返修日期:2018-08-15 本文受国家自然科学基金(61501511)资助。

彭磊(1993-),男,硕士生,主要研究方向为物理层安全;臧国珍(1978-),女,博士,副教授,主要研究方向为物理层安全和协同通信, E-mail: zgz_nj78@sina.com(通信作者);高媛媛(1968-),女,博士,教授,主要研究方向为移动通信和 MIMO;沙楠(1981-),男,讲师,主要研究方向为物理层网络编码和协同通信;奚晨婧(1993-),女,硕士生,主要研究方向为物理层安全;蒋炫佑(1993-),男,硕士生,主要研究方向为物理层安全。

合法目的端接收到的干扰信号与其已知的干扰信号是不完全相同的,实际上合法目的端若不采取专门的干扰消除手段,则很难完全消除接收信号中的干扰信号,除非系统能获得理想的信道估计和系统同步。目前几乎没有考虑信道变化对人工干扰信号影响的相关研究,而且也没有如何消除人工干扰信号的相关研究。现有研究中存在的这些问题表明:要想使人工干扰技术在物理层安全通信系统中得到实际应用,还需对其展开进一步的实用性研究。

随着自适应滤波理论的不断发展和完善,目前自适应滤波在众多领域得到了广泛应用。贝尔实验室的 Kelly 于 1965 年首次提出将自适应滤波用于回音消除,同年 Widrow 提出了自适应谱线增强器,并将其应用于消除译码器输出端的干扰以及心电图的放大器^[9-10]。传统滤波器具有固定的滤波器系数,而自适应滤波器通过逐步迭代来不断调整滤波器系数,可使其稳态误差最小。基于维纳滤波理论发展起来的 LMS 算法因易于实现、性能稳定、计算复杂度低等特点在众多领域中得到了广泛应用,而基于 LMS 算法进行迭代来调整系数的自适应滤波器也已被广泛应用于各种自干扰消除技术中^[11-14]。

基于以上考虑,本文针对外部窃听者对无线通信系统信息传输带来的安全威胁,提出一种由源节点在发送源信息的同时发送人工干扰信号来提高信息传输安全性能的安全传输方案。为消除人工干扰信号在合法目的端对源信息正确恢复的影响,本文将 LMS 自适应算法用于人工干扰信号的估计与消除中,提出一种基于 LMS 算法的人工干扰自适应消除方案。为检验所提方案的效果,文中以 QPSK 调制系统为例,专门设计了一种简单易行的人工干扰信号。针对平坦瑞利衰落信道环境,通过对系统误比特率(BER)进行 MATLAB 仿真,验证了本文方案的有效性,并得到了适用于本文方案的 LMS 算法的最优步长因子和滤波器阶数。

本文第 2 节对讨论的系统模型进行了详细描述;第 3 节对自适应干扰消除原理进行了简单概述;第 4 节针对 QPSK 调制信号设计了相应的人工干扰信号,并利用基于 LMS 算法的自适应滤波器对合法目的端处的人工干扰信号进行了消除处理;第 5 节进行仿真实验;最后给出结论。

2 系统模型

本文考虑如图 1 所示的存在外部窃听者的无线通信系统模型。其中,S、D 和 E 分别表示源节点、合法目的端和窃听者,S 发送源信息的同时发送人工干扰以降低窃听者 E 处的接收信噪比(SINR)。假设所有节点都只有一根天线用于发送或接收信息,工作于半双工模式,系统中 S-D 链路和 S-E 链路都是瑞利衰落信道。

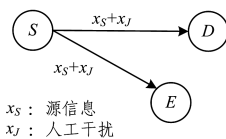


图 1 系统模型

Fig. 1 System model

合法目的端和窃听者接收到的信号可以分别表示为:

$$y_D = (x_s + x_j)h_{SD} + z_D \tag{1}$$

$$y_E = (x_s + x_j)h_{SE} + z_E \tag{2}$$

其中, x_s 和 x_j 分别表示源信号和人工干扰信号, h_{SD} 和 h_{SE} 分别为 S-D 链路和 S-E 链路的准静态独立且服从瑞利分布的信道系数, $z_D \sim CN(0, \sigma_D^2)$ 和 $z_E \sim CN(0, \sigma_E^2)$ 分别表示在目的端和窃听端接收到的加性高斯白噪声。

虽然假设合法目的端已知人工干扰信号 x_j ,但是 x_j 进入瑞利衰落信道后会受到随机分布的信道系数的影响,再到合法接收端的干扰信号与合法目的端已知的干扰信号是不完全相同的,即变成了 $h_{SD}x_j$,合法目的端要想对源信息进行正确恢复,首先必须对 $h_{SD}x_j$ 进行有效消除。理论上,合法目的端在已知 x_j 的条件下,如果能获得理想的信道状态信息 h_{SD} 并保持系统同步,即可对接收信号中的干扰信号 $h_{SD}x_j$ 实施完全消除,然而在实际系统中要想获得理想的信道状态信息 h_{SD} 并保持系统同步是非常困难的,因此通常不能对干扰信号 $h_{SD}x_j$ 进行完全消除。本文拟采用自适应干扰消除方法对合法目的端接收到的干扰信号 $h_{SD}x_j$ 进行消除。

3 自适应干扰消除原理

自适应滤波是自适应干扰消除的核心。本节主要对自适应滤波原理和 LMS 自适应算法进行简单介绍。

自适应滤波器是根据输入信号利用自适应算法对滤波器系数进行自动调整的。自适应滤波器的结构如图 2 所示,其基本结构一般由 M 阶的线性滤波器和自适应算法两部分组成。图 2 中 $x(n)$ 为自适应滤波器的输入, $d(n)$ 为参考信号, $y(n)$ 为自适应滤波器的输出, $e(n)$ 为误差信号。自适应算法通过采用某种特定的算法,根据误差信号 $e(n)$ 的变化自动调节滤波器的系数。

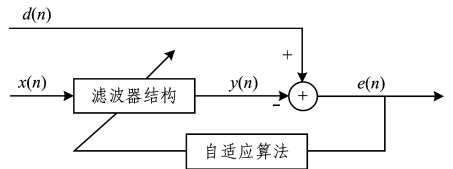


图 2 自适应滤波器结构图

Fig. 2 Adaptive filter structure

在先验知识不足的情况下,自适应滤波器由于在时变系统中具有明显的优势,因此在系统辨识、回波消除、天线阵波束形成、自适应信道均衡、噪声消除等众多领域得到了广泛应用^[15]。它虽然被应用于不同的领域,但其基本工作原理是相同的,只是滤波器的输入信号和参考信号不同而已。

本文系统模型中的人工干扰消除问题类似于自适应滤波器的噪声消除,将人工干扰信号 x_j 看作是滤波器的输入信号 $x(n)$,将滤波器的输出 $y(n)$ 作为人工干扰的估计信号,将合法目的端接收到的源信号和人工干扰信号的混合信号作为参考信号 $d(n)$,则经过自适应滤波所得的误差信号 $e(n)$ 即为合法目的端对人工干扰进行消除后的源信号。

假设暂不考虑信道加性噪声 $z(n)$ 的影响,将合法目的端

接收到的源信号和人工干扰信号的混合信号作为参考信号 $d(n)$, 则可表示为:

$$d(n) = s(n) + x_0(n) \quad (3)$$

其中, $s(n)$ 和 $x_0(n)$ 分别为源信号和干扰信号。假设两者是不相关的, 即

$$E[s(n)x_0(n-k)] = 0 \quad (4)$$

假设滤波器输入的干扰信号 $x(n)$ 与源信号 $s(n)$ 也是不相关的, 即

$$E[s(n)x(n-k)] = 0 \quad (5)$$

但是滤波器输入的干扰信号与干扰信号 $x_0(n)$ 可能相关, 也可能不相关, 即

$$E[x_0(n)x(n-k)] = p(k) \quad (6)$$

或

$$E[x_0(n)x(n-k)] = 0 \quad (7)$$

其中, $p(k)$ 为延迟为 k 的互相关函数^[10]。

滤波器的输出 $y(n)$ 可以表示为:

$$y(n) = \sum_{k=0}^{M-1} w_k x(n-k) = \mathbf{x}^T(n) \mathbf{w}(n) = x_0'(n) \quad (8)$$

其中, $\mathbf{x}^T(n)$ 表示长度为 M 的向量 $\mathbf{x}(n)$ 的转置, $x_0'(n)$ 表示干扰信号 $x_0(n)$ 的估计信号, 从混合信号 $d(n)$ 中减去 $y(n)$ 即可得到误差信号 $e(n)$, 即:

$$e(n) = d(n) - y(n) = s(n) + x_0(n) - x_0'(n) \quad (9)$$

将误差信号 $e(n)$ 送入自适应算法模块, 通过特定的算法来控制滤波器抽头系数的自动更新。

在信号或噪声的特性未知或者随时间变化的情况下, 自适应滤波器具有传统滤波器无法比拟的性能优势。在控制滤波器抽头系数自动调整的多种自适应算法中, 最小均方(LMS)算法以其低复杂度、便于实现和稳定性好等特点而被广泛应用^[15]。下面对 LMS 算法进行简要介绍。

自适应滤波器的误差函数为:

$$e(n) = d(n) - y(n) = d(n) - \mathbf{x}^T(n) \mathbf{w}(n) \quad (10)$$

其中, $d(n)$ 为参考信号, $\mathbf{x}(n)$ 为输入信号向量, $\mathbf{w}(n)$ 为滤波器系数向量, $y(n)$ 为滤波器的输出。 $e(n)$ 是滤波器系数的函数, 则均方误差为:

$$\begin{aligned} \xi &= E[|e(n)|^2] = E[s(n) + x_0(n) - y(n)]^2 \\ &= E[s^2(n)] + E[x_0(n) - y(n)]^2 + 2E[s(n)(x_0(n) - y(n))] \end{aligned} \quad (11)$$

而 $s(n)$ 与 $x_0(n)$, $x(n)$ 是不相关的, 则:

$$E[s(n)(x_0(n) - y(n))] = 0 \quad (12)$$

进而有:

$$\xi = E[s^2(n)] + E[x_0(n) - y(n)]^2 \quad (13)$$

自适应滤波器按照一定的算法调整其系数, 可以使均方误差 ξ 最小, 从而可使 $y(n)$ 十分接近 $x_0(n)$ 。取误差信号 $e(n)$ 为系统的输出, 则其非常接近 $s(n)$ ^[16]。而用于递归计算滤波器系数以搜索 ξ 最小值的算法应具有以下形式:

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) + \mu(n) \mathbf{S}(n), n=0, 1, \dots \quad (14)$$

其中, $\mathbf{w}(n)$ 为第 n 次迭代的滤波器系数矢量, $\mu(n)$ 为第 n 次迭代的步长, $\mathbf{S}(n)$ 为第 n 次迭代的方向矢量。

最简单的寻找 ξ 最小值的递归方法是最速下降搜索方

法。在最速下降搜索算法中, 方向矢量 $\mathbf{S}(n) = -\mathbf{g}(n)$, $\mathbf{g}(n)$ 是第 n 次迭代的梯度矢量, 其每次迭代的估计值为:

$$\mathbf{g}(n) = \frac{d\xi(n)}{d\mathbf{w}(n)} = 2e(n) \frac{de(n)}{d\mathbf{w}(n)} = -2e(n)\mathbf{x}(n) \quad (15)$$

将式(15)代入式(12)可得:

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) + 2\mu(n)e(n)\mathbf{x}(n) \quad (16)$$

这即是经典的随机梯度下降算法, 该算法具有变化的步长。而在自适应滤波器的实际应用中, 通常使用固定步长的算法, 其原因有两个: 1) 固定步长的算法无论是硬件还是软件都很容易实现; 2) 固定步长适用于跟踪时变信号的统计特性。正因如此, 式(14)可改写为另一种形式:

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) + 2\mu e(n)\mathbf{x}(n) \quad (17)$$

其中, μ 为固定步长因子。这便是众所周知的 LMS 算法。由以上滤波器系数的更新迭代关系式可知, 下一时刻的滤波器系数由当前时刻系数和误差函数共同决定。

4 QPSK 信息安全传输系统中的人工干扰信号的设计和消除

QPSK 调制以其在频带利用率和误比特率两方面的突出性能优势以及便于正交实现而在实际系统中得到了广泛应用。本节以采用人工干扰和 QPSK 调制方式的信息安全传输系统为例, 设计了一种简单易行的人工干扰信号, 利用 LMS 自适应滤波器对合法接收端的接收信号中的人工干扰信号进行了估计和消除处理。

4.1 QPSK 信息安全传输系统中的人工干扰信号的设计

图 3 为采用格雷码映射的一种 QPSK 调制星座图。

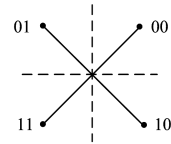


图 3 QPSK 星座图

Fig. 3 Constellation of QPSK

第 k 个码元内的 QPSK 信号可表示为^[17]:

$$s_k(t) = A \cos(2\pi f_c t + \theta_k), k=1, 2, 3, 4, \dots \quad (18)$$

其中, A 为常数, 为简化下文分析且不失一般性, 可取 A 为 1; θ_k 为已调信号的相位, 当基带码元的取值分别为 00, 01, 10,

11 时, θ_k 的取值分别为 $\frac{\pi}{4}, \frac{3\pi}{4}, \frac{7\pi}{4}, \frac{5\pi}{4}$ 。对式(18)进行三角变换, QPSK 信号还可表示为如下正交形式:

$$s_k(t) = a_k \cos 2\pi f_c t - b_k \sin 2\pi f_c t, k=1, 2, 3, 4, \dots \quad (19)$$

其中, $a_k = \cos \theta_k, b_k = \sin \theta_k$, 有 $-1 < a_k, b_k < 1$ 。可见, QPSK 信号可看作由正弦和余弦两个正交分量合成的信号, 即 QPSK 信号可看作两个正交 BPSK 信号之和。由此, 可得 QPSK 信号的正交调制器, 其由于实现简单, 因此在实际系统中得到了广泛应用。解调时, 常用两路正交的相干载波 $\cos 2\pi f_c t$ 和 $\sin 2\pi f_c t$ 对接收信号分别进行解调, 再将两路并行的码元经过并/串变换成串行数据输出。QPSK 的正交调制与解调器的原理框图如图 4 和图 5 所示。

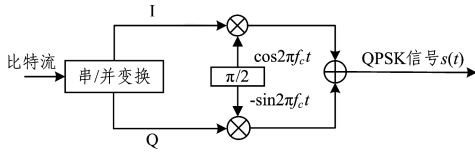


图 4 QPSK 调制原理框图

Fig. 4 Block diagram of QPSK modulation principle

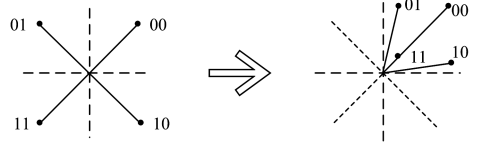


图 6 QPSK 信号中加入 AI 前后的星座图变化

Fig. 6 Change of constellation before and after adding AI in QPSK signals

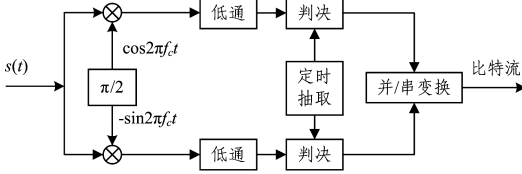


图 5 QPSK 解调原理框图

Fig. 5 Block diagram of QPSK demodulation principle

鉴于上述 QPSK 调制解调原理,我们在 QPSK 信号中的同相分量 a_k 和正交分量 b_k 上分别加上 1。当 a_k 或 b_k 小于 0 时,对 a_k 或 b_k 加上 1 将使其大于 0,这相当于对调制器中两支路上的 BPSK 信号进行了相位反转。在解调规则不变的情况下,接收端解调器两支路上将会出现误判。而当 a_k 或 b_k 大于 0 时,由于加 1 不会改变两支路 BPSK 信号的极性,则解调出的码元不会出现错误。这样,理论上能使系统误比特率达到最大,即 50%。按照上述思路可得人工干扰(Artificial Interference, AI)信号为:

$$x_j = \cos 2\pi f_c t - \sin 2\pi f_c t \quad (20)$$

此时,QPSK 信号和该人工干扰信号的混合信号可表示为:

$$s_k^{AI}(t) = (a_k + 1)\cos 2\pi f_c t - (b_k + 1)\sin 2\pi f_c t, \quad k = 1, 2, 3, 4, \dots \quad (21)$$

4.2 人工干扰信号对源信息的影响

当 QPSK 信号采用图 3 所示 QPSK 星座图时,在加入人工干扰信号后,源信息的相位变化和在原解调规则下的判决输出信号如表 1 所列。

表 1 加入 AI 后的信号相位和原解调规则下的恢复码元情况
Table 1 Singal phase after adding AI and condition of recovery symbols under original demodulation rules

码元	00	01	10	11
原相位	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{3\pi}{4}$	$\frac{7\pi}{4}$	$\frac{5\pi}{4}$
加入 AI 后的相位	$\frac{\pi}{4}$	1.4	0.17	$\frac{\pi}{4}$
原解调规则下的恢复码元	00	00	00	00

根据表 1 可知,在 QPSK 信号中加入人工干扰后,在不考虑信道衰落和噪声的情况下,窃听端采用原解调规则将把 4 种不同的发送码元都恢复为 00,即加入式(20)的干扰信号相当于把 QPSK 星座图中的 4 个星座点全部搬移到了第 1 象限,如图 6 所示,这样理论上能使窃听者的误比特率(BER)达到 50%。而对于合法接收端,由于其已知人工干扰信号的形式,利用 LMS 自适应消除算法对人工干扰信号进行消除,能将人工干扰信号对合法接收端正确译码带来的影响降到最低,从而实现人工干扰信号对窃听者的干扰,保证了信息的安全传输。

关于该安全传输方案下源节点发送的信号对源信息发送量的影响,由于发送 QPSK 信号和发送人工干扰信号占用的系统功率相同,因此在使用相同系统功率的条件下,与不发送人工干扰信号相比,该方案发送源信息的功率效率为 50%。

4.3 合法接收端人工干扰信号的消除

利用上节介绍的 LMS 自适应滤波器,本节对前述 QPSK 信息安全传输系统中的人工干扰信号进行了消除处理,具体过程如算法 1 所示。

算法 1 合法目的端消除人工干扰的 LMS 自适应算法

目的:消除合法目的端接收信号 $h_{SD}x_S + h_{SD}x_J + z_D$ 中的 $h_{SD}x_J$,以正确恢复源信息

参数:滤波器阶数 M 和步长因子 μ

Step 1 初始化目的端滤波器系数向量,并作为迭代起点:

$$w(0) = 0$$

Step 2 对人工干扰信号项进行估计:

$$y(n) = w^T(n) (\tilde{h}_{SD}(n) x_J(n)) \approx h_{SD}(n) x_J(n)$$

其中, $\tilde{h}_{SD}(n)$ 为第 n 时刻的信道估计值, $\tilde{h}_{SD}(n) x_J(n)$ 为滤波器的输入信号 $x(n)$,接收信号 $y_D(n) = (x_S(n) + x_J(n))h_{SD}(n) + z_D(n)$ 为滤波器的参考信号 $d(n)$ 。

Step 3 从接收到的混合信号中减去人工干扰信号的估计信号,从而得到源信号经历信道的近似信号:

$$e(n) = y_D(n) - y(n) \approx h_{SD}(n) x_S(n) + z_D(n)$$

Step 4 更新滤波器系数向量,使估计更加准确:

$$w(n+1) = w(n) + 2\mu e(n) x_J(n)$$

算法 1 首先初始化合法目的端自适应滤波器的系数向量,通过自适应滤波器对人工干扰信号项进行估计,从接收到的混合信号中减去人工干扰信号项的估计信号,即可得到合法目的端期望的信号项。算法中不断更新滤波器系数向量 $w(n)$ 使 $y(n) \approx h_{SD}(n) x_J(n)$,使得误差信号为期望得到的信号 $e(n) \approx x_S(n)h_{SD}(n) + z_D(n)$ 。

5 仿真结果

本节对合法目的端利用 LMS 自适应算法消除人工干扰进行了 MATLAB 仿真。首先,比较了加入人工干扰前后 QPSK 星座图的变化。接着,通过仿真验证了本文所提方案的有效性,并得到了使系统合法目的端误比特率最小的 LMS 算法的步长因子和滤波器阶数。

取 SNR=8 dB,得到的加入人工干扰前后的接收端星座图如图 7 所示。图 7(a)为没有人工干扰时窃听者和合法目的端接收到 QPSK 信号的星座图,从图中可以看出 4 种不同码元分别位于 4 个象限。图 7(b)为加入人工干扰后窃听者和合法目的端接收到的星座图,4 种不同码元大部分位于第

一象限,窃听者将无法正确恢复码元。而对于合法目的端,在已知人工干扰信号先验知识的前提下,采用LMS自适应算法能够尽可能地消除人工干扰信号带来的不利影响,从而使其正确恢复出源信息。

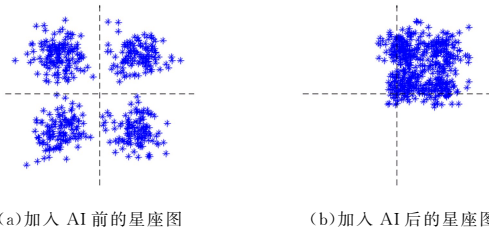


图7 不加AI的接收端星座图和加入AI的接收端星座图
Fig. 7 Constellation of receivers before and after adding AI

图8给出了合法目的端自适应滤波器中LMS算法的步长因子对误比特率影响的仿真曲线。仿真是在Rayleigh信道条件下进行的,取滤波器阶数为5,不同曲线表示信噪比SNR取不同的值。从仿真结果可以看出,无论信噪比取5dB,10dB或者15dB,BER都在步长因子 μ 取 10^{-4} 左右时达到最小值,且信噪比越大,BER越小,最优步长 μ 对BER性能的影响越明显。因此可得到该自适应滤波器的最优步长因子为 10^{-4} ,故在接下来的仿真中取 $\mu=10^{-4}$ 。

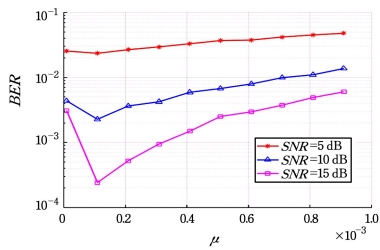


图8 步长因子 μ 对误比特率BER的影响
Fig. 8 Influence of step factor μ on BER

取最优步长因子 $\mu=10^{-4}$,图9给出了不同滤波器阶数下误比特率随信噪比SNR变化的仿真结果,图中不同曲线表示滤波器阶数 M 取不同的值。从图9可以看出,在低信噪比区域,4条曲线重合在一起,但是随着SNR的不断增大,曲线逐渐分开,并且当滤波器阶数取3时,BER明显大于其他3条曲线,这是由于滤波器阶数太小,算法收敛速度较慢,从而导致BER增大。而其他3条曲线在高信噪比区域相差不大,且滤波器阶数取5时,BER略低于其他两条,这是因为当滤波器阶数过大时,算法的稳态误差较大从而导致BER有所上升。因此得到最优滤波器阶数 $M=5$ 。

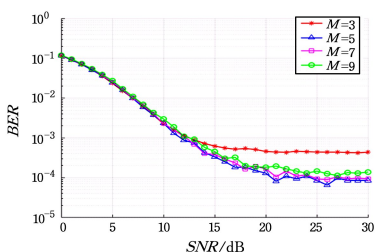


图9 不同滤波器阶数 M 下误比特率BER随SNR的变化
Fig. 9 Change of BER with SNR under different filter order M

图10是窃听者、合法目的端的误比特率以及瑞利衰落信道下QPSK理论误比特率的比较图,在图中合法目的端处自适应滤波器取最优参数: $M=5, \mu=10^{-4}$ 。从图10可以看出,随着SNR的增大,窃听者的误比特率基本保持在50%左右,而合法目的端利用LMS自适应算法消除人工干扰后的误比特率不断减小,在低信噪比区域,其与QPSK误比特率理论线比较接近;在高信噪比区域,其与理论线间存在一定差距,且随着信噪比的增大,该差距逐渐增大。由此说明人工干扰对窃听者起到了良好的干扰效果;合法目的端利用LMS算法对人工干扰进行了有效消除,但仍然存在部分人工干扰残余对合法目的端正确恢复源信息产生了影响。

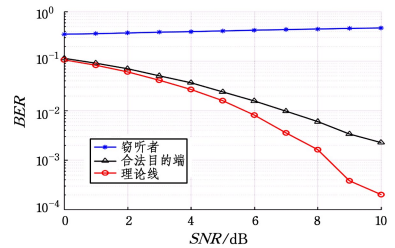


图10 窃听者和合法目的端的误比特率比较
Fig. 10 Comparison of BER at eavesdropper and destination

当前已有的通过发送人工干扰信号来提高信息传输安全性的研究多数是假设合法目的端能够理想消除人工干扰信号,人工干扰信号对合法端的正确译码没有影响^[18-20]。本文为推进人工干扰技术在物理层安全通信系统的实用性,提出了基于LMS自适应算法的人工干扰消除方案,相比当前已有方案,该方案更符合实际,对比结果(图10中的合法目的端曲线和理论线)可以发现,通过LMS算法对人工干扰信号进行消除后的误比特率曲线与当前已有研究中假设的人工干扰能够理想被消除的误比特率曲线较为接近,但是仍存在部分人工干扰残余对正确恢复源信息产生了影响,因此当前已有研究中关于人工干扰能够被理想消除的假设是不切实际的。

结束语 本文针对无线通信系统信息传输面临的安全威胁,提出了一种由源节点发送人工干扰的安全传输方案。为消除人工干扰对合法目的端正确恢复源信息带来的影响,本文将LMS自适应算法应用于人工干扰的消除,并提出了一种基于LMS算法的人工干扰消除方案。为验证该方案的有效性,本文以QPSK调制系统为例,设计了一种简单易行的人工干扰信号。通过仿真得到了使系统误比特率最小的步长因子和滤波器阶数,并验证了所设计的人工干扰和LMS算法的有效性。

下一步工作将更深入地研究物理层安全中人工干扰的消除方案,借助现有的干扰消除和信号分离方法,针对不同的人工干扰信号设计出不同的消除方案,以实现信息高效安全传输的目的。

参考文献

- [1] WYNER A D. The wire-tap channel [J]. The Bell System Technical Journal, 1975, 54(8): 1355-1387.

- [2] ZHOU L. Research on Physical Layer Security of Cognitive Radio Based on Cooperative Communication[C]//2015 Sixth International Conference on Intelligent Systems Design and Engineering Applications. Guiyang,IEEE Press,2015;661-664.
- [3] LI L,PETROPULU A P,CHEN Z,et al. Improving Wireless Physical Layer Security via Exploiting Co-Channel Interference [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing,2016,10(8):1433-1448.
- [4] WANG L,TEH K C,LI K H. Artificial Noise Aided Physical Layer Security in Multi-Antenna Small-Cell Networks [J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security,2017,12(6):1470-1482.
- [5] HU L,WEN H,WU B,et al. Adaptive Secure Transmission for Physical Layer Security in Cooperative Wireless Networks[J]. IEEE Communications Letters,2017,21(3):524-527.
- [6] ZHANG Q,GAO Y,ZANG G,et al. Physical layer security for cooperative communication system with untrusted relay based on jamming signals [C] // 2015 International Conference on Wireless Communications & Signal Processing. Nanjing, IEEE Press,2015:1-4.
- [7] YANG Y,CHEN J,HUANG Y,et al. Secure Transmission of Wireless Relaying Systems with Jammer and Multiple-User Selection[J]. IEEE Access,2017,5:8771-8779.
- [8] LONG H,WANG J,ZHANG Y Y,et al. Cooperative Jamming Technique,Proposal, Survey and Future [J]. Telecommunications Science,2013,29(1):109-114. (in Chinese)
龙航,王静,张月莹,等. 协作干扰技术的提出、现状和未来展望 [J]. 电信科学,2013,29(1):109-114.
- [9] HAYKIN S. Adaptive Filter Theory[M]. Upper Saddle River: Prentice Hall,2002;325-415.
- [10] WIDROW B,GOODLIN R C. Adaptive noise canceling: principles and applications [J]. Proceedings of the IEEE,1975,63(12):1692-1716.
- [11] HUANG B. Performance Analysis of NCLMS-based PCMA [C]//2016 3rd International Conference on Information Science and Control Engineering. Beijing,IEEE Press,2016:1375-1378.
- [12] ARIF M, NASEEM I, MOINUDDIN M, et al. Adaptive noise cancellation using q-LMS [C] // 2017 International Conference on Innovations in Electrical Engineering and Computational Technologies. Karachi; IEEE Press,2017:1-4.
- [13] LIU J,QUAN H,LI Z,et al. Digital Nonlinear Self-Interference Cancellation Based on LMS-Volterra Algorithm [C] // 2016 3rd International Conference on Information Science and Control Engineering. Beijing; IEEE Press,2016:1298-1302.
- [14] GORRIZ J M,RAMIREZ J,CRUCES-ALVAREZ, et al. A Novel LMS Algorithm Applied to Adaptive Noise Cancellation[J]. IEEE Signal Processing Letters,2009,16(1):34-37.
- [15] JIN J,WANG X,YU Y B,et al. Adaptive De-noising Method of Ballistocardiogram Based on Orthogonal Wavelet Transform [J]. Computer Science,2010,37(8):232-235. (in Chinese)
金晶晶,王旭,于艳波,等. 基于正交小波变换的心冲击图自适应去噪方法 [J]. 计算机科学,2010,37(8):232-235.
- [16] PANDA S,MOHANTY M N. Performance analysis of LMS based algorithms used for impulsive noise cancellation [C] // 2016 International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies. Nagercoil; IEEE Press,2016:1-4.
- [17] PROAKIS J G. Digital Communications (Fifth Edition) [M]. New York, McGraw-Hill,2007:101-103.
- [18] LI B,LIANG T. Cooperative jamming secure scheme for untrusted full-duplex relay system [C] // 2016 2nd IEEE International Conference on Computer and Communication (ICCC). Chengdu; IEEE Press,2016:2328-2331.
- [19] LV L,CHEN J,YANG L,et al. Improving physical layer security in untrusted relay networks: cooperative jamming and power allocation [J]. IET Communication,2017,11(3):393-399.
- [20] HE B,SHE Y,LAU V K N. Artificial Noise Injection for Securing Single-Antenna Systems [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology,2017,66(10):9577-9581.