

一种宽带 OFDM 系统中记忆非线性功放的 预失真方法*

张念华, 任智源

(西安电子科技大学 通信工程学院, 西安 710071)

摘要: 针对宽带 OFDM 系统中功放的记忆非线性失真问题, 提出一种新的频域预失真方案。该方案在频域建立具有自适应更新的幅度、相位预失真矩阵, 对信号幅度和相位分别进行多次预失真处理。为提高自适应预失真收敛速度, 提出一种新的预失真矩阵自适应更新算法, 即 linear convergence 算法。仿真结果表明, 发送信号频谱旁瓣较二维查表法压低 6 dB。误码率为 10^{-4} 时, 该方法比二维查表法约有 2 dB 的信噪比增益。此外, linear convergence 更新算法收敛速度比二维查表法中的更新算法提高 75%。提出的频域预失真方案能够有效提高收敛精度和收敛速度。

关键词: 功率放大器; 记忆非线性失真; 频域预失真; 线性收敛算法

中图分类号: TP391; TP393

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2018)03-0870-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2018.03.048

Predistortion method for memory nonlinear amplifier in wideband OFDM system

Zhang Nianhua, Ren Zhiyuan

(College of Communication Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: To solve memory nonlinear distortion problem of power amplifier in wideband OFDM system, this paper proposed a new frequency domain predistortion scheme. This scheme built the adaptive updating amplitude and phase predistortion matrices in the frequency domain respectively, which did amplitude and phased predistortion repeatedly. Furthermore, to improve convergence speed of the adaptive predistortion, this paper developed a novel algorithm of the adaptive predistortion matrices, called linear convergence algorithm. Simulation results show that, the transmission signal's spectral side lobes are 6 dB lower than those of the two-dimensional look-up table method. And when the BER is 10^{-4} , the proposed method also has about 2 dB gain of SNR. In addition, the convergence speed of linear convergence algorithm is increased by 75%. Thus, the proposed frequency domain predistortion scheme can improve the convergence accuracy and convergence speed effectively.

Key words: power amplifier; memory nonlinear distortion; frequency domain predistortion; linear convergence algorithm

0 引言

通信技术的快速发展及移动互联浪潮的兴起使得终端用户呈指数增长, 这对频谱资源的利用率和数据传输速率提出了更高的要求^[1]。高效的调制方式(如 quadrature amplitude modulation, QAM)及高效传输技术(如 orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)由于具有高频谱利用率和数据传输速率, 在通信系统中得到广泛应用。OFDM 信号是由多个正交的子载波线性叠加而成, 当各个子载波相位一致时会出现较大的峰均比(peak to average power ratio, PAPR), 扩大信号包络的动态变化范围。具有高峰均比、非恒定包络的 OFDM 信号通过射频功率放大器(radio frequency power amplifier, RFPA)时会产生非线性失真, 从而造成子载波间干扰。功放具有较大的线性工作范围才能适应包络变化, 而大多数信号远离该峰值, 若采用线性范围大的功放又会降低系统工作效率。功放的工作效率和线性度存在矛盾关系^[2], 因此必须在保证功放工作效率的前提下提高功放线性度。此外, 由于 OFDM 信号子载波较多,

基带波形频带较宽, 在通过功放时产生的失真还会表现出记忆效应^[3]。功放的记忆性失真和非线性失真会造成信号星座图偏转, 增加系统误码率, 并且还会对邻近信道造成干扰, 影响邻近信道的通信质量。因此, 必须采用必要的功放线性化技术来减少功放记忆非线性失真对传输信号的影响^[4]。

成熟的功放线性化方法有前馈法^[5]、负反馈法^[6]、预失真法^[7]等, 其中数字预失真法具有稳定、高效、自适应能力强等优点, 得到广泛的研究与应用^[8,9]。文献[10]提出了一种基于反馈模型的数字预失真方法, 该方法可以消除信号记忆效应对判决结果的影响, 但该预失真算法的误差波动较大。文献[11]提出一种将直接学习方法和间接学习方法相结合的数字预失真方法, 该方法能够提高功放线性化性能, 但是增加了系统复杂度和实现成本。文献[12]提出一种基于频域二维查表法的数字预失真方法, 该方法具有结构灵活和易于实现的优点, 缺点是查询表体积较小时会影响收敛精度, 过大又会导致收敛速度过慢^[13]。因此设计一种结构简单且能够有效解决记忆非线性失真的预失真方案对功放线性化技术的实际应用具

收稿日期: 2016-11-17; **修回日期:** 2017-01-16 **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(61401331); 国家重点研发计划政府间专项项目(2016YFE0123000); 高校基本科研业务费(20101155739)

作者简介: 张念华(1991-), 男, 山东日照人, 硕士研究生, 主要研究方向为功放线性化技术等(nhzhang@s-an.org); 任智源(1983-), 男, 陕西西安人, 副教授, 博士研究生, 主要研究方向为绿色无线电、功放线性化技术、雾计算网络等。

有重要的现实意义。

为能够减小预失真系统复杂度的同时有效解决记忆非线性失真,本文提出一种记忆非线性功放频域预失真方案。该方案相对文献[11]提出的方案具有结构简单易于实现的优点,并且能够有效解决文献[12]预失真方案存在的收敛精度问题。为提高本文方案的收敛速度,在自适应更新算法上提出 linear convergence 算法,该算法较文献[12]提出的更新算法能够显著提高收敛速度。

1 系统模型和预失真原理

1.1 带预失真的 OFDM 系统模型

图1为加入自适应预失真器的 OFDM 系统发射机模型原理框图。OFDM 系统是一种多载波传输系统,其将高速串行输入的二进制信息流进行正交幅度调制(QAM),串/并转换为 M 个并行的低速传输数据,该并行数据依次通过预失真器进行预畸变处理,经过快速傅里叶变换(inverse fast Fourier transform, IFFT),进行并串转换,完成带预失真器的 OFDM 信号调制。预失真器参数的更新通过将 PA 输出的信号反馈回来与串并转换后的预失真器输入信号进行自适应算法实现。

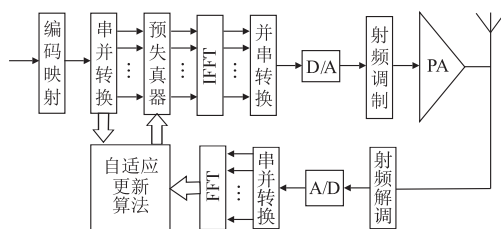


图1 OFDM系统自适应预失真发射机原理

1.2 放大器通用仿真模型

放大器的数学模型大体可以分为无记忆功放模型和有记忆功放模型;当输入信号带宽足够小时,被看做无记忆非线性功放模型;当输入信号带宽较宽时,被看做有记忆非线性功放模型。

1.2.1 无记忆 HPA 模型

无记忆功放模型只考虑 AM-AM 和 AM-PM 因素,该模型不具有记忆性,经常被用在窄带无线通信系统环境中。简单且拟合度高的 Saleh 模型经常被用在无记忆功放的仿真中^[14]。Saleh 模型的 AM-AM 特性和 AM-PM 特性分别为

$$\begin{cases} A(r) = \frac{\alpha_1 r}{1 + \beta_1 r^2} \\ \varphi(r) = \frac{\alpha_2 r^2}{1 + \beta_2 r^2} \end{cases} \quad (1)$$

其中: r 为信号包络; α_1 、 β_1 、 α_2 、 β_2 为模型参数。

1.2.2 有记忆 HPA 模型

Volterra 级数可以准确表示非线性系统,经常用来建立有记忆的 HPA 模型,但是随着参数的增多,计算量非常庞大。除了 Volterra 级数模型,Wiener 模型也是常用的有记忆 HPA 模型。

Wiener 模型由线性子系统 $M()$ 串联无记忆非线性子系统 $N()$ 而成,其中线性子系统由有限冲击响应滤波器实现,无记忆非线性子系统可以用 Saleh 模型实现,该模型结构如图2所示。由于 Wiener 模型形式简单而且具有明确的物理意义,常用来模拟宽带应用中 PA 的记忆非线性特性,本文的记忆非线性放大器也采用 Wiener 模型。



图2 Wiener模型结构图

1.3 预失真原理

1.3.1 数字预失真

预失真工作原理是在功放前端级联一个特性与放大器特性相反的预失真器(digital pre-distortion, DPD),使输入信号对整个系统呈现线性特性。预失真工作原理如图3和4所示^[15],设信号输入为 $x(t)$,DPD 的信号输出为 $y(t)$,预失真特性为 $F()$,功放特性为 $G()$ 。预失真线性化原理可以表示为

$$z(t) = G(F(x(t))) = L(x(t)) = g \times x(t) \quad (2)$$

为了便于分析,本文中的预失真设计取 $g = 1$ 。预失真技术的核心就是设计具有预失真特性 $F()$ 的结构和算法,使其与功放复合满足式(2)。

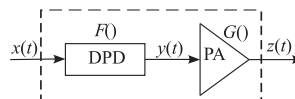


图3 预失真结构框图

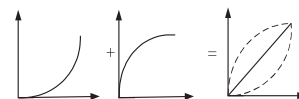


图4 预失真原理

由于 PA 模型在实际应用中记忆非线性特性 $G()$ 未知,并且其受到信号本身以及环境的影响,因此通常采用自适应数字预失真技术,即将放大器的输出信号反馈并与经过一定延迟的原输入信号进行比较,根据比较结果采用自适应算法更新功放的预失真参数,使其能够实时地跟踪放大器特性变化,保证放大器的线性输出。本文接下来将在频域对功放的记忆非线性失真进行预失真建模分析。

1.3.2 频域记忆非线性预失真

首先对无记忆非线性失真进行频域预失真分析,频域非线性预失真简化框图如图5所示。

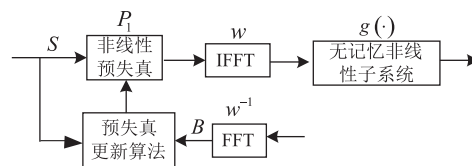


图5 频域非线性预失真框图

图中 S 表示输入信号; P_1 表示非线性预失真; w 表示快速傅里叶逆变换; $g(\cdot)$ 表示无记忆非线性子系统; w^{-1} 表示快速傅里叶变换; B 表示反馈信号,有

$$B = w^{-1} \cdot g(w \cdot P_1 \cdot S) \quad (3)$$

当频域预失真抵消无记忆非线性子系统造成的非线性失真即 $B = S$,有

$$P_1 = w^{-1} \cdot g^{-1}(w \cdot S) \cdot S^{-1} \quad (4)$$

所以,针对频域的非线性失真 $N()$ 有

$$N(P_1 \cdot S) = S \quad (5)$$

接下来对记忆性失真进行频域预失真分析,频域记忆预失真简化框图如图6所示。

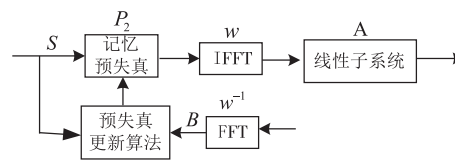


图6 频域记忆预失真框图

图中 S 表示输入信号; P_2 表示记忆预失真; w 表示快速傅里叶逆变换; A 表示线性子系统; w^{-1} 表示快速傅里叶变换; B 表示反馈信号,有

$$B = w^{-1} \cdot A \cdot w \cdot P_2 \cdot S \quad (6)$$

当频域预失真抵消线性子系统造成的记忆性失真即 $P_2 = w^{-1} \times A^{-1} \times w$, 有

$$P_2 = w^{-1} \times A^{-1} \times w \quad (7)$$

所以, 针对频域的记忆失真 $M(\cdot)$ 有:

$$M(P_2 \cdot S) = S \quad (8)$$

通过以上分析可以看出, 记忆失真和非线性失真都可以通过在频域用预失真矩阵对输入信号进行预失真处理来抵消。在记忆非线性失真中, 若频域有矩阵 P 满足 $P = P_2 \cdot P_1$, 则由式(5)和(8)可以推导出:

$$N(M(P \cdot S)) = N(M(P_2 \cdot P_1 \cdot S)) = N(P_1 \cdot S) = S \quad (9)$$

即功放记忆非线性预失真中, 系统的频域存在矩阵 P 能同时抵消记忆失真和非线性失真, 该结论是本文提出的记忆功放新型预失真方案的理论依据, 接下来对新型预失真方案进行介绍。

2 记忆功放新型预失真方案

2.1 频域自适应数字预失真

本文提出的记忆功放预失真方案的基本思想是在频域建立两个分别包含幅度增益和相位偏转信息的自适应更新预失真矩阵对 OFDM 输入信号的幅度、相位进行预畸变, 将每组 OFDM 信号多次循环输入该系统进行预失真并更新预失真矩阵, 直到功放输出的信号达到系统要求的输出精度再将信号输出。

OFDM 系统具有确定的子载波数目, 依据子载波的编号 i 为索引, 在频域对每组输入数据极坐标下的幅度和相位构建预失真矩阵, 分别对幅度和相位进行预畸变, 从而实现对功放记忆性失真和非线性失真的预失真处理, 预失真矩阵通过将功放输出信号反馈与输入信号进行自适应算法进行更新。该方案的简化框图如图 7 所示。

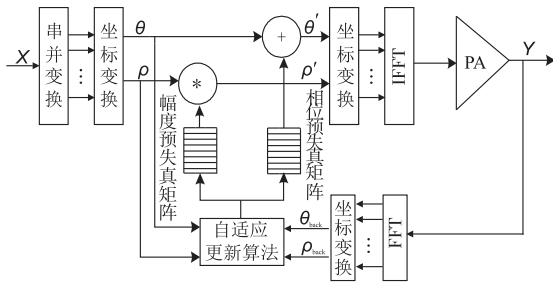


图7 频域预失真简化框图

假设输入信号 $X = [x_1, x_2, \dots, x_k, \dots, x_n]^T$, 其中 x_k 为第 k 个子载波上的传输信号, 输入信号幅度矩阵 $\rho = (\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_k, \dots, \rho_n)^T$, 输入信号相位矩阵 $\theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k, \dots, \theta_n]^T$, 且有 $x_k = \rho_k e^{j\theta_k}$ 。通过自适应更新算法得到幅度预失真矩阵 ξ 和相位预失真矩阵 ϕ , 则预畸变后的信号幅度 ρ' 和相位 θ' 可表示为

$$\rho' = \xi \rho = \begin{pmatrix} \xi_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \xi_k \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \rho_1 \\ \vdots \\ \rho_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \xi_1 \rho_1 \\ \vdots \\ \xi_k \rho_k \end{pmatrix} \quad (10)$$

$$\theta' = \theta + \phi = \begin{pmatrix} \theta_1 \\ \vdots \\ \theta_k \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \phi_1 \\ \vdots \\ \phi_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \theta_1 + \phi_1 \\ \vdots \\ \theta_k + \phi_k \end{pmatrix} \quad (11)$$

为了通过预失真减小输出数据的线性误差, 对同一组 OFDM 输入信号进行多次频域预失真和功放记忆非线性失真的同时自适应更新预失真矩阵。当预畸变信号经功放输出达

到收敛精度时将该信号发送, 并对下一组输入信号进行自适应预失真处理, 具体流程图如图 8 所示。

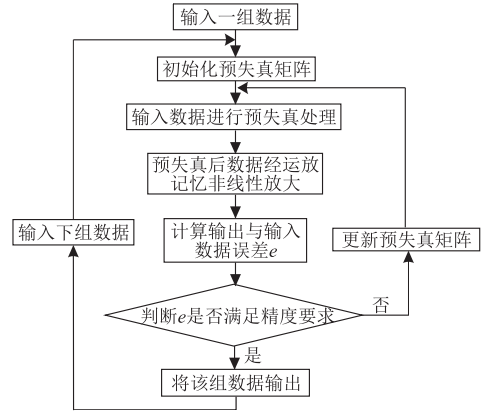


图8 频域预失真流程

2.2 预失真自适应更新算法

对每组 OFDM 信号分别进行多次预失真循环迭代将会增加系统的计算量, 本方案如果采用文献[12]中的更新算法收敛速度将会变慢, 因此本文提出一种新的自适应更新算法 linear convergence 算法。接下来对该算法进行推导, 模型简化框图如图 9 所示。



图9 自适应更新算法模型简化图

输入数据为 X , 初始化预畸变因子为单位矩阵, FIR 滤波器和 HPA 的整体增益为 H , 则输出 Y 满足方程:

$$Y = H \cdot X \quad (12)$$

将上式变形有:

$$H \cdot \frac{X}{Y} = 1 \quad (13)$$

若输出 Y 为有失真的输出信号, 将记忆非线性系统预畸变因子更新为 $\frac{X}{Y}$ 来对输入信号进行预失真处理, 此时将该组数据再一次输入该带预失真的记忆非线性功放有

$$Y' = H \cdot \frac{X}{Y} \cdot X = X \quad (14)$$

若输出 $Y' = X$, 可以看做系统失真已被纠正。在不考虑功放记忆效应的理想情况下, 对一组 OFDM 信号 X 进行第二次循环迭代就能实现功放非线性预失真。但是记忆失真不仅与当前的输入有关, 还与之前的输入信号有关, 并存在一定的记忆深度, 所以迭代次数达到功放记忆深度时才能达到预期的收敛精度^[16]。

该预失真算法的复频域更新式可以写为

$$H' = H \cdot \frac{X}{Y} \quad (15)$$

其中: $\frac{X}{Y}$ 为预失真增益, 将预失真增益写成相应的幅度和相位形式为

$$\begin{cases} \xi_{k,n+1} = \xi_{k,n} \cdot \frac{|x_k|}{|y_k|} \\ \varphi_{k,n+1} = \varphi_{k,n} + (\arg(x_k) - \arg(y_k)) \end{cases} \quad (16)$$

其中, k 为 OFDM 系统传输信号的第 k 个子载波信号; n 为第 n 次数据预失真过程。

3 仿真分析

为了验证本文所提出的频域预失真方案在宽带 OFDM 系

统记忆非线性功放预失真上的性能,本节将利用 MATLAB 软件在宽带 OFDM 系统中对本文提出的预失真方法和文献[12]中的二维查表法进行仿真,比较上述两种预失真方案的线性化效果。仿真选用 1024 点 OFDM,其中 256 个子载波传输数据,剩余子载波补零用于过采样,星座点映射采用 16QAM 方形映射,放大器输出功率回退为 8 dB。

记忆非线性放大器模型选取 Saleh 模型作为无记忆非线性子系统,所用 Saleh 模型的具体参数设置为

$$\begin{cases} A(r) = 2r/(1+r^2) \\ \varphi(r) = \pi r^2/(1+3r^2) \end{cases} \quad (17)$$

线性子系统采用一个 3 阶 FIR 滤波器等效:

$$H(z) = 0.7692 + 0.1538z^{-1} + 0.0769z^{-2} \quad (18)$$

3.1 接收端星座图比较

为验证本文预失真方案对功放记忆非线性失真的纠正效果,对本文方法和二维查表法接收端星座图进行了仿真对比,仿真结果如图 10 所示。对比接收端星座图仿真结果可以看出,放大器记忆非线性失真带来的星座点漂移和偏转问题在这两种方法中都能够得到有效的解决。但是通过本文方法的星座点基本无偏差的收敛到对应位置,而二维查表法的星座点还存在一定的偏差,这表明本文方法收敛效果优于二维查表法。

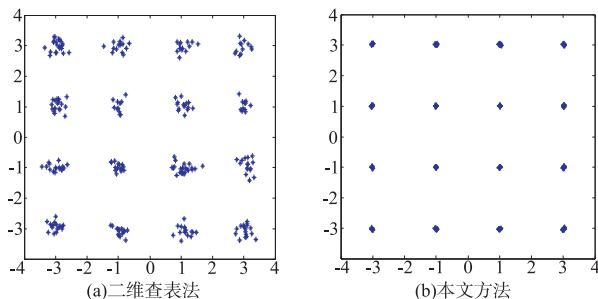


图10 本文方法和二维查表法接收端星座图

3.2 收敛速度与收敛精度比较

本小节通过误差函数仿真预失真方案的收敛速度和收敛精度,设预失真输入信号为 $X = [x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n]^T$, 功放输出信号为 $Y = [y_1, y_2, \dots, y_i, \dots, y_n]^T$, 定义误差函数 e 为

$$e = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - x_i|^2}{n} \quad (19)$$

为能够直观反映本文所提出预失真方案在收敛速度与收敛精度性能上的提升,将本文方法和文献[12]提出的预失真方案做了仿真对比,仿真结果如图 11 所示。

通过该图可以看出本文提出的预失真方案收敛精度比文献[12]中方案的收敛精度高出一个数量级,在收敛速度方面,均方误差为 10^{-4} 时本文方法只需要约 20 次循环迭代,相比文献[11]的 80 次循环迭代速度提高了 75%。

3.3 发送信号频谱图比较

为验证本文方法对邻近信道干扰的抑制效果,仿真了本文方法和文献[12]方法发送端信号的频谱图,仿真结果如图 12 所示。图中四条曲线由上到下依次是不使用预失真情况、二维查表法、本文方法和理想情况下的发送信号频谱图。通过该图可以看出两种方法都能压低信号频谱旁瓣,但是相比之下,本文方法较二维查表法压低 6 dB 左右,这能够更有效的降低邻道干扰。

3.4 高斯白噪声信道条件下误码率性能

为了验证本文方案在误码率性能上的提升,在高斯白噪声

信道下对本文方法和二维查表法进行了仿真。仿真结果如图 13 所示,图中四条曲线由上到下分别为不使用预失真情况、二维查表法、本文方法、理想情况下的 OFDM 系统误码率性能曲线。通过误码率性能曲线可以看出,相对不使用预失真的 OFDM 系统,本文方法和文献[12]方法都能大幅度提高系统的误码率性能。但是相对而言,本文方法的误码率性能仍然优于二维查表法,当误码率为 10^{-4} 时,本文方法相对二维查表法约有 2 dB 的增益。

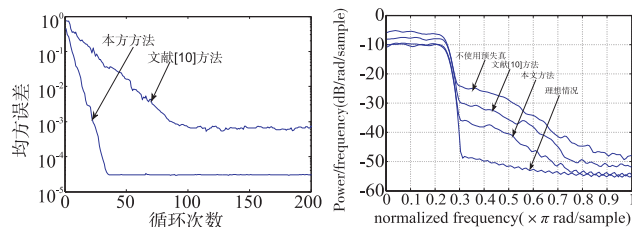


图11 收敛精度和收敛速度对比仿真图

图12 本文方法和二维查表法的频谱比较图

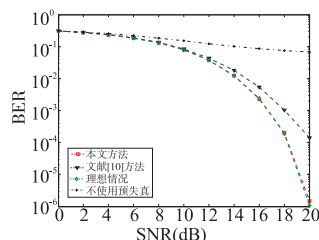


图13 两种方法误码率性能比较

4 结束语

无线通信技术的快速发展推动移动互联浪潮的兴起,终端设备的更高数据传输速率决定通信带宽随之增加。然而功放的记忆效应随着通信带宽的增加对通信系统性能的影响越来越显著。针对以上迫切需要解决的现实问题,本文提出一种结构简单易于实现且收敛精度高的预失真方案,在该方案中提出的改进自适应更新算法能够显著提高预失真收敛速度。

最后通过理论分析和 MATLAB 仿真验证,本文提出的预失真方案能够有效解决宽带 OFDM 系统中放大器记忆非线性失真的问题,接下来的研究工作会继续优化自适应更新算法,在降低算法复杂度同时进一步提高收敛效率。总之,本文提出的记忆非线性功放预失真方案对工程实践中预失真器的设计应用具有一定的参考意义。

参考文献:

- [1] Kelly N, Cao Wenhui, Zhu Anding. Preparing linearity and efficiency for 5G: digital predistortion for dual-band doherty power amplifiers with mixed-mode carrier aggregation [J]. IEEE Microwave Magazine, 2016, 18(1): 76-84.
- [2] 杨剑. OFDM 系统非线性自适应功率放大效能分析[J]. 通信技术, 2016, 49(4): 408-412.
- [3] Tafuri F F, Sira D, Nielsen T S, et al. Memory models for behavioral modeling and digital predistortion of envelope tracking power amplifiers [J]. Microprocessors & Microsystems, 2015, 39(8): 879-888.
- [4] 周楠清. OFDM 系统中功率放大器的预失真技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2008.
- [5] 刘迪迪, 宋树祥, 曾凡峰, 等. 自适应前馈预失真功率放大器的研究[J]. 广西师范大学学报: 自然科学版, 2013, 31(3): 17-22.
- [6] 胡欣, 王刚, 王自成, 等. 射频预失真器与基带预失真算法结合对行波管功率放大器线性化改善的影响[J]. 通信学报, 2012, 33(7): 158-163.

(下转第 878 页)

量的提高,成功传输的时隙数也会增加,更好的信道质量增加了数据成功传输的有效性。

图11是网络的吞吐量随信道质量 σ 的变化情况。可见,网络的吞吐量随着信道质量的增加而上升。与图10相对应,当信道质量等于0时,由于信道发生错误,三种方案的吞吐量均为0。此后,随着信道质量的不断增加,CRTC-MAC方案的吞吐量要比另外两种方案要高。这是因为新方案优化了传输的帧结构,减小了冗余数据的额外开销,使得更多的资源能够被用来传输有效数据,因此网络的吞吐量得到了提高。

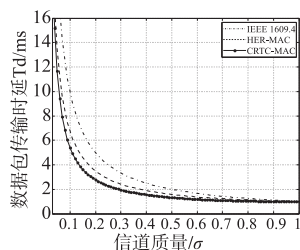


图10 数据包的传输时延随信道质量的变化图

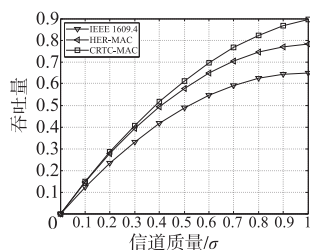


图11 网络的吞吐量随信道质量的变化图

4 结束语

本文针对CR-VANET的特点提出了一种TDMA/CSMA相结合的多信道MAC(CRTC-MAC)协议,在固定时隙分配采用基于无竞争的TDMA接入方案,在动态时隙分配时采用基于竞争的CSMA接入方案,通过引入退避机制来实现优先级的划分,高优先级节点产生的退避时间少,优先启动握手机制占用信道进行通信,而低优先级节点在侦听到信道被占用后,将计时器挂起,进入等待状态,等待属于自己的时隙或下一个在本时隙无数据业务需求释放的时隙。通过对比IEEE 1609.4以及HER-MAC协议,表明所提出的协议能够有效降低时隙分配时节点间数据传输的碰撞概率,降低数据包的重传次数,减少传输时延,提高网络的服务质量。

参考文献:

- [1] 唐伦,王晨梦,陈前斌,等. 车载自组织网络中基于时分复用的异步多信道MAC协议[J]. 计算机学报,2015,38(3): 673-684.
- [2] Vandung N, Thant Z O, Pham C, et al. An efficient time slot acquisition on the hybrid TDMA/CSMA multichannel MAC in VANETs[J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20(5): 970-973.
- [3] 叶翔,章国安,程黛月,等. 车载自组织网络协作MAC协议研究[J]. 计算机科学,2015,42(11): 174-177.
- [4] 鲁鹏,刘权. 面向信道跳转认知无线网络的CSMA/CA MAC协议[J]. 计算机工程,2016,42(1): 95-102.
- [5] 朱江,张玉平,柴源,等. 认知无线网络中基于隐马尔可夫预测的P-CSMA协议[J]. 电视技术,2014,38(19): 80-84.
- [6] IEEE, IEEE Std. 1609. 4 Multi-channel operation corrigendum: wireless access in vehicular environments (WAVE) [S]. Piscataway: IEEE Press, 2014.
- [7] Fei H, Daisuke M, Yasushi W, et al. RTOB: ATDMA-based MAC protocol to achieve high reliability of one-hop broadcast in VANET [C]//Proc of IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communication Workshops. 2015: 87-92.
- [8] 宋彩霞,谭国真,丁男,等. 面向应用的车载自组织网络跨层多信道MAC协议[J]. 通信学报,2016,37(5): 95-105.
- [9] 王晨梦,赵云鹏,唐伦,等. 基于时分复用的车载自组织网多信道MAC协议[J]. 计算机工程与设计,2014,35(5): 1521-1525.
- [10] Haddad A, Muhlethaler P, Laouiti A, et al. TDMA-Based MAC protocols for vehicular ad hoc networks: a survey, qualitative analysis, and open research issues[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 17(4): 2461-2492.
- [11] Peppino F, Floriano D R, Cesare S. A predictive cross-layered interference management in a multichannel MAC with reactive routing in VANETs[J]. IEEE Trans on Mobile Computing, 2016, 15(8): 1850-1862.
- [12] Dang D N M, Hong C S, Lee S, et al. An efficient and reliable MAC in VANETs[J]. IEEE Communications Letters, 2014, 18(4): 616-619.
- [13] 孙伟,张和生,潘成,等. 基于Markov链的车载自组网MAC层建模及分析[J]. 吉林大学学报,2015,45(4): 1304-1310.
- [14] Xin Y, Ling W. A multichannel transmitting and assistant nodes MAC protocol for mobile ad hoc networks[C]//Proc of 2015 IEEE Globecom Workshops. 2015: 1-5.
- [15] Deuk L, Syed H A, Dongkyun K, et al. An efficient SCH utilization scheme for IEEE 1609. 4 multi-channel environments in VANETs [C]//Proc of 2016 IEEE International Conference on Communications. 2016: 1-6.
- [16] Duc N M D, Hanh N D, Vandung N, et al. HER-MAC: a hybrid efficient and reliable MAC for vehicular ad hoc networks[C] //Proc of IEEE 28th International Conference on Advanced Information Networking and Applications. 2014: 186-193.
- [7] 孔潇维,夏威,何子述. 数字预失真系统对各种误差的敏感度分析[J]. 计算机应用研究, 2013,30(12): 3674-3677.
- [8] 韩冰,晋东立. 卫星通信中16QAM信号的数字预失真研究[J]. 飞行器测控学报, 2015(2): 184-188.
- [9] 王飞俊,金明录,孙鹏. 一种数字预失真器的实现方法[J]. 通信技术, 2011,44(1):154-156.
- [10] Tang Chengkai, Lian Baoweng, Zhang Yi. Dual loop feedback predistortion in satellite communication[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2013,24(4): 586-591.
- [11] 曲昀,南敬昌,毛陆虹,等. 射频功放数字预失真新方法研究[J]. 微电子学, 2013,43(3):440-444.
- [12] 任智源,张海林. OFDM系统中记忆非线性放大器的高效预失真技术[J]. 西安电子科技大学学报, 2009,36(5):777-781.
- [13] Chen H H, Lin C H, Huang P C, et al. Joint polynomial and look-up-table predistortion power amplifier linearization [J]. Circuits & Systems II Express Briefs IEEE Transactions on, 2006,53(8): 612-616.
- [14] 张小梅. 基于数字预失真技术的功放线性化研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012.
- [15] Ran Shengyi, Xiong Yushu. The research of digital predistortion linearization mechanism by fuzzy decision[C]//Proc of the 8th International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation. Washington DC: IEEE Computer Society, 2016: 826-828.
- [16] 任智源,韩燕,张海林,等. 宽带OFDM系统中的简化滤波查表预失真算法[J]. 系统工程与电子技术, 2010,32(7):1369-1372.

(上接第873页)