

多时滞无线通信网络的功率和速率最优跟踪^①

韩存武^② 常舒瑞 刁 奇 刘 蕾

(北方工业大学现场总线及自动化北京市重点实验室 北京 100144)

摘 要 研究了无线通信网络的功率和速率控制这一热点问题。针对传统的无线通信网络模型并没有同时考虑状态时滞和输入时滞,已有的功率和速率控制算法也不能保证系统具有最优输出跟踪性能的情况,重新建立了无线通信网络的模型,在建模过程中考虑了多时滞,得到了含有不同的状态时滞和输入时滞的功率和速率控制系统模型,在此基础上,研究了一般形式的多时滞模型的时滞补偿算法,并将该算法应用在提出的多时滞模型中,给出了无线通信网络功率和速率的最优跟踪控制律。经过计算机仿真验证,提出的最优控制律具有良好的控制性能。

关键词 无线通信网络, 传输时滞, 多时滞系统, 功率控制, 速率控制, 最优跟踪

0 引 言

随着无线通信网络的发展,现有的无线通信网络支持传输的媒体信息种类越来越多,在给人们的生活带来巨大便利的同时,一些相关问题也凸显了出来,如通信质量下降、网络连接不可靠、网络拥塞等。这些问题的出现,固然有网络本身的原因,然而,加强对网络的管理和控制,也可以提高网络的服务质量(quality of service, QoS)。在实际工业生产过程中,时滞是极为普遍的现象。同样,传输时滞也是无线通信网络的功率和速率控制中需要解决的主要问题之一。对无线通信网络建模时,需要将时滞考虑在内。无线通信网络中包括两种形式的传输时滞,即基站(BS)到移动台(mobile station, MS)(下行链路)之间的传输时滞和移动台到基站(上行链路)之间的传输时滞。这种传输时滞包括信号在无线信道中的传输时滞和在基站(或移动台)的信号处理时滞^[1]。无线通信网络模型中,状态和输入都存在时滞,而且状态时滞和输入时滞并不相同。现

有的无线通信网络功率和速率控制方法大多数都是基于信噪比分配的功率控制^[2-15],而这种方法对时滞的影响非常敏感。因此,在对无线通信网络进行功率和速率控制时,不仅需要将传输时滞引入到建模过程中,建立包含状态时滞和输入时滞的多时滞模型,而且对包含多时滞的模型进行稳定性和最优控制算法的研究也具有重要意义。

无线通信网络功率和速率的联合控制,引起了国内外学者的高度关注,并且取得了一些可喜的成果^[2-7]。文献[2]研究了具有时变干扰的无线网络中视频流的联合功率控制和速率适配,文献[3]提出了无线通信网络的功率和速率控制最优跟踪算法。但所用模型中没有引入时滞,文献[4,5]从控制理论的角度,提出了包含状态时滞的无线通信网络功率和速率控制系统的状态空间模型,并提出了无线通信网络的功率和速率鲁棒控制方法,然而该文献只考虑了速率控制中的时滞,没有考虑功率控制中的时滞。文献[6]将文献[4,5]的结果推广到了具有输入时滞的情况,继而提出了一种功率和速率的预测控制方法,然而模型当中却不包含状态时

① 国家自然科学基金(61573024, 61203230)和北京市自然科学基金(4142014, 4154068, 4152014)资助项目。
② 男,1961年生,博士,教授;研究方向:无线通信网络,计算机网络,网络化控制系统等;联系人,E-mail: cwhan@ncut.edu.cn
(收稿日期:2016-11-29)

滞。文献[7]给出了针对无线通信网络的非线性时滞模型进行功率和速率联合控制的线性矩阵不等式(linear matrix inequality, LMI)方法,但状态时滞和输入时滞相同。由此可见,现有的研究成果,均未建立包含不同状态时滞和输入时滞的多时滞模型,也未对这种多时滞模型进行最优跟踪的研究。本文首先从控制理论出发,依据无线通信网络的一系列基本公式,将功率控制和速率控制的时滞均考虑在内,建立了包含状态时滞 λ 和输入时滞 τ 的多时滞的无线通信网络系统模型,然后,基于最优控制理论,研究了多时滞模型的一般形式的时滞补偿方法,并将该方法应用在本文提出的多时滞模型当中,提出了针对多时滞模型的最优跟踪算法,通过求解矩阵黎卡提代数方程,得到最优功率和速率控制律。最后对最优控制算法进行了计算机仿真,仿真结果表明,所提出的最优控制算法对多时滞的无线通信网络功率和速率具有很好的控制性能。

1 系统模型与问题描述

在蜂窝移动通信网络中,每一个蜂窝称为一个小区,假定每个小区当中有一个基站,该基站服务于 n 个移动台。依据通信原理,在基站接收到的第 i 个移动台的信噪比为

$$\gamma_i(k) = \frac{g_{ii}(k)p_i(k - \lambda_i)}{\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n g_{ij}(k)p_j(k - \lambda_j) + \sigma_i^2} \quad (1)$$

其中, $\gamma_i(k)$ 是基站(BS)接收到的实际信噪比, $g_{ii}(k)$ 和 $g_{ij}(k)$ 分别是第 i 个移动站(MS)和第 j 个 MS 到基站 BS 的信道增益, $p_i(k - \lambda_i)$ 和 $p_j(k - \lambda_j)$ 分别是移动台 i 和移动台 j 的发射功率, λ_i 和 λ_j 是往返时滞, σ_i^2 是高斯随机干扰。

令

$$\beta_i(k) = \frac{g_{ii}(k)}{\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n g_{ij}(k)p_j(k - \lambda_j) + \sigma_i^2} \quad (2)$$

则式(1)可以写为

$$\gamma_i(k) = \beta_i(k)p_i(k - \lambda_i) \quad (3)$$

由于无线通信网络中使用的量纲是分贝,因而对式(3)等号两边取对数,得

$$\bar{\gamma}_i(k) = \bar{\beta}_i(k) + \bar{p}_i(k - \lambda_i) \quad (4)$$

其中 $\bar{\gamma}_i(k) = \ln \gamma_i(k)$, $\bar{\beta}_i(k) = \ln \beta_i(k)$, $\bar{p}_i(k - \lambda_i) = \ln[p_i(k - \lambda_i)]$ 。

由文献[4,5]知

$$\bar{\beta}_i(k + 1) = \bar{\beta}_i(k) + n_i(k) \quad (5)$$

其中, $n_i(k)$ 是均值为 0、方差为 σ_n^2 的随机干扰并且独立于 $\bar{p}_i(k)$ 。

采用分布式功率控制算法^[4,5],有

$$\bar{p}_i(k + 1) = \bar{p}_i(k) + \alpha_i[\bar{\gamma}_i^*(k) - \bar{\gamma}_i(k)] \quad (6)$$

其中 α_i 是功率控制步长, $\gamma_i^*(k)$ 是期望信噪比, $\bar{\gamma}_i^*(k) = \ln \gamma_i^*(k)$ 。

由上述式(4),(5)和(6),可以得到

$$\begin{aligned} \bar{\gamma}_i(k + 1) &= \bar{\beta}_i(k + 1) + \bar{p}_i(k + 1 - \lambda_i) \\ &= [\bar{\beta}_i(k) + n_i(k)] \\ &\quad + \{\bar{p}_i(k - \lambda_i) + \alpha_i[\bar{\gamma}_i^*(k - \lambda_i) - \bar{\gamma}_i(k - \lambda_i)]\} \\ &= [\bar{\beta}_i(k) + n_i(k)] + [\bar{\gamma}_i(k) - \bar{\beta}_i(k)] \\ &\quad + \alpha_i \bar{\gamma}_i^*(k - \lambda_i) - \alpha_i \bar{\gamma}_i(k - \lambda_i) \\ &= \bar{\gamma}_i(k) - \alpha_i \bar{\gamma}_i(k - \lambda_i) + \alpha_i \bar{\gamma}_i^*(k - \lambda_i) + n_i(k) \end{aligned} \quad (7)$$

令 $f_i(k)$ 是无线通信网络中移动台 i 的传输速率,由文献[4,5]知

$$\begin{aligned} f_i(k + 1) &= f_i(k) + \mu[d(k) - c_1(k)f_i(k) \\ &\quad - c_2(k)f_i(k - \lambda_i)] \end{aligned} \quad (8)$$

其中 $\mu > 0$ 是速率控制步长, $c_1(k)$ 、 $c_2(k)$ 是网络的拥塞参数, $d(k)$ 是均值为 0、方差为 σ_d^2 的随机干扰。

根据香农容量定理,得

$$f_i(k) = \frac{1}{2} \log_2[1 + \gamma_i^*(k)] \quad (9)$$

通常情况下, $\gamma_i^*(k) \gg 1$, 所以式(8)可以写成

$$\begin{aligned} \bar{\gamma}_i^*(k + 1) &= [1 - \mu c_1(k)] \bar{\gamma}_i^*(k) \\ &\quad - \mu c_2(k) \bar{\gamma}_i^*(k - \lambda_i) + \bar{\mu} d(k) \end{aligned} \quad (10)$$

其中 $\bar{\mu} = 20\mu / \log_2(10)$ 。

为了方便起见,下面的叙述中省略下标 i 。引入状态变量

$$x(k) = \begin{bmatrix} \bar{\gamma}(k) \\ \bar{\gamma}^*(k) \end{bmatrix} \quad (11)$$

则由上述式(7)和(10),得

$$\begin{aligned} x(k+1) = & \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 - \mu c_1(k) \end{bmatrix} x(k) \\ & + \begin{bmatrix} -\alpha & \alpha \\ 0 & -\mu c_2(k) \end{bmatrix} x(k-\lambda) \\ & + \begin{bmatrix} n(k) \\ \bar{\mu}d(k) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (12)$$

为了使实际的信噪比 $\gamma_i(k)$ 和实际的传输速率跟踪期望信噪比 $\gamma_i^*(k)$ 和期望的传输速率,并将输入时滞考虑在内,在式(12)中引入控制变量 $u(k-\tau)$,得到无线通信网络功率和速率控制系统的数学模型

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) = & \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 - \mu c_1(k) \end{bmatrix} \mathbf{x}(k) \\ & + \begin{bmatrix} -\alpha & \alpha \\ 0 & -\mu c_2(k) \end{bmatrix} \mathbf{x}(k-\lambda) \\ & + \begin{bmatrix} b_p & 0 \\ 0 & b_f \end{bmatrix} \mathbf{u}(k-\tau) + \begin{bmatrix} n(k) \\ \bar{\mu}d(k) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (13)$$

其中 b_p, b_f 是待定系数。

更简捷地,可以给出以下形式的模型:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) = & \mathbf{A}(k)\mathbf{x}(k) + \mathbf{A}_d(k)\mathbf{x}(k-\lambda) \\ & + \mathbf{B}_d(k)\mathbf{u}(k-\tau) + \boldsymbol{\omega}(k) \end{aligned} \quad (14)$$

其中

$$\begin{aligned} \mathbf{A}(k) = & \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 - \mu c_1(k) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A}_d(k) = \\ & \begin{bmatrix} -\alpha & \alpha \\ 0 & -\mu c_2(k) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_d(k) = \begin{bmatrix} b_p & 0 \\ 0 & b_f \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\omega}(k) = \\ & \begin{bmatrix} n(k) \\ \bar{\mu}d(k) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (15)$$

2 功率和速率最优控制算法

在这一节里,首先研究一般的离散多时滞系统的最优跟踪控制律,即,根据文献[16]使用的方法,对如式(16)所示多时滞系统引入增广状态向量,获得不显含时滞的差分方程,再根据离散形式的性能指标函数,导出了系统的最优跟踪律。得到一般形

式系统的最优控制律之后,根据上述推导的模型式(14),给出本文无线通信网络的多时滞模型的最优跟踪律。

对如下的一般多时滞系统:

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \sum_{i=1}^{n_1} \mathbf{A}_i \mathbf{x}(k-\lambda_i) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k) \\ \quad + \sum_{j=1}^{n_2} \mathbf{B}_j \mathbf{u}(k-\tau_j) \\ \mathbf{y}(k) = \mathbf{C}\mathbf{x}(k) + \mathbf{D}\mathbf{u}(k) \end{cases} \quad (16)$$

其中, $\lambda_i (i = 1, 2, \dots, n_1)$ 和 $\tau_j (j = 1, 2, \dots, n_2)$ 分别为状态时滞和输入时滞,并假定

$$\lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_{n_1} > 0 \quad (17)$$

$$\tau_1 > \tau_2 > \dots > \tau_{n_2} > 0 \quad (18)$$

这一节的目的是要设计稳定的、使系统输出跟踪参考输入 $r(k)$ 的最优控制律,即对于系统式(16),设计使下述目标函数达到最小的最优控制律:

$$J = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{\infty} \left[\mathbf{e}^T(k) \mathbf{Q}_1 \mathbf{e}(k) + \Delta \mathbf{x}^T(k) \mathbf{Q}_2 \Delta \mathbf{x}(k) + \Delta \mathbf{u}^T(k) \mathbf{R} \Delta \mathbf{u}(k) \right] \quad (19)$$

其中

$$\mathbf{e}(k) = \mathbf{r}(k-1) - \mathbf{y}(k-1) \quad (20)$$

$$\Delta \mathbf{x}(k) = \mathbf{x}(k) - \mathbf{x}(k-1) \quad (21)$$

$$\Delta \mathbf{u}(k) = \mathbf{u}(k) - \mathbf{u}(k-1) \quad (22)$$

而 $\mathbf{Q}_1, \mathbf{R}$ 分别为 $p \times p$ 和 $m \times m$ 正定加权阵, $\mathbf{Q}_2$ 为 $n \times n$ 非负定加权阵。其中引入 $\Delta \mathbf{x}$ 和 $\Delta \mathbf{u}$ 的目的就是为消除余差,引入积分作用。为此,由以上方程,构造如下差分方程:

$$\begin{cases} \Delta \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A} \Delta \mathbf{x}(k) + \sum_{i=1}^{n_1} \mathbf{A}_i \Delta \mathbf{x}(k-\lambda_i) \\ \quad + \mathbf{B} \Delta \mathbf{u}(k) + \sum_{j=1}^{n_2} \mathbf{B}_j \Delta \mathbf{u}(k-\tau_j) \\ \mathbf{e}(k+1) = \mathbf{e}(k) - \mathbf{C} \Delta \mathbf{x}(k) - \mathbf{D} \Delta \mathbf{u}(k) \end{cases} \quad (23)$$

由上述式(23)组成了增广系统,包含时滞的控制变量增量只出现在第一个式子中,因此构造如下 $(n+p+\tau m) \times 1$ 的增广状态向量 $\mathbf{Z}(k)$, 式为

$$\mathbf{Z}(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{e}(k) \\ \Delta \mathbf{x}(k) \\ \Delta \mathbf{x}(k-1) \\ \cdots \\ \Delta \mathbf{x}(k-\lambda_1) \\ \Delta \mathbf{u}(k-1) \\ \cdots \\ \Delta \mathbf{u}(k-\tau_1) \end{bmatrix} \quad (24)$$

由此,差分方程式(23)可写成如下增广系统形式:

$$\mathbf{Z}(k+1) = \bar{\mathbf{A}}\mathbf{Z}(K) + \bar{\mathbf{B}}\Delta \mathbf{u}(k) \quad (25)$$

其中

$$\bar{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} I & -C & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ 0 & A & A_1 & A_2 & \cdots & B_1 \\ 0 & 0 & 0 & I_m & \cdots & 0 \\ \vdots & & & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & & & & \ddots & I_m \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & \cdots & 0 \end{bmatrix}, \bar{\mathbf{B}} = \begin{bmatrix} -D \\ B \\ 0 \\ \vdots \\ \vdots \\ I_m \end{bmatrix} \quad (26)$$

根据以上描述,我们可以看到,在增广系统式(25)中,滞后项不再出现了,因此可将最优跟踪控制问题式(20)变为在约束式(26)下使

$$J = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{\infty} [\mathbf{Z}^T(k) \mathbf{Q} \mathbf{Z}(k) + \Delta \mathbf{u}^T(k) \mathbf{R} \Delta \mathbf{u}(k)] \quad (27)$$

达到最小,其中

$$\mathbf{Q} = \text{diag}[\mathbf{Q}_2, \mathbf{Q}_1, 0 \cdots 0] \quad (28)$$

这是普通的 LQ 问题。

接下来给出系统的最优控制律。

对系统式(16),能够实现最优跟踪的控制律为

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{u}(k) = & -\mathbf{K}_1 \Delta \mathbf{x}(k) - \mathbf{K}_2 \mathbf{e}(k) \\ & - \sum_{i=1}^{\lambda} \mathbf{K}_p(i) \Delta \mathbf{x}(k-i) \\ & - \sum_{j=1}^{\tau} \mathbf{K}_d(j) \Delta \mathbf{u}(k-j) \end{aligned} \quad (29)$$

其中

$$\mathbf{K} = [\mathbf{R} + \bar{\mathbf{B}}^T \mathbf{P} \bar{\mathbf{B}}]^{-1} \bar{\mathbf{B}}^T \mathbf{P} \bar{\mathbf{A}} \quad (30)$$

$$\mathbf{K}_p^* = [\mathbf{K}_p(1) \cdots \mathbf{K}_p(\lambda_1)] \quad (31)$$

$$\mathbf{K}_d^* = [\mathbf{K}_d(1) \cdots \mathbf{K}_d(\tau_1)] \quad (32)$$

$\mathbf{P}$ 为下式黎卡提方程的解:

$$\mathbf{P} = \bar{\mathbf{A}}^T \mathbf{P} \bar{\mathbf{A}} - \bar{\mathbf{A}}^T \mathbf{P} \bar{\mathbf{B}} [\mathbf{R} + \bar{\mathbf{B}}^T \mathbf{P} \bar{\mathbf{B}}]^{-1} \bar{\mathbf{B}}^T \mathbf{P} \bar{\mathbf{A}} + \mathbf{Q} \quad (33)$$

本文第 1 节推导的无线通信网络的多时滞模型式(14),显然是本文第 2 节研究的一般系统模型式(16)的特殊形式。也就是说,第 2 节提出的最优跟踪控制律式(29)可以灵活应用于模型式(14)的控制过程中。

以下将说明最优控制律式(29)应用于模型式(14)的过程。

模型式(14)相较于模型式(16)来说, $n_1 = n_2 = 0$, 状态方程和输出方程中 $\mathbf{u}(k)$ 的系数 B 和 D 为零。由此,适用于模型式(14)的差分方程为

$$\begin{cases} \Delta \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A} \Delta \mathbf{x}(k) + \mathbf{A}_d \Delta \mathbf{x}(k-\lambda) \\ \quad + \mathbf{B}_d \Delta \mathbf{u}(k-\tau) \\ \mathbf{e}(k+1) = \mathbf{e}(k) - \mathbf{C} \Delta \mathbf{x}(k) \end{cases} \quad (34)$$

由式(34)构造适用于模型式(14)的增广向量状态为

$$\mathbf{Z}(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{e}(k) \\ \Delta \mathbf{x}(k) \\ \Delta \mathbf{x}(k-1) \\ \Delta \mathbf{x}(k-2) \\ \Delta \mathbf{u}(k-1) \end{bmatrix} \quad (35)$$

差分方程式(34)的增广系统形式为

$$\mathbf{Z}(k+1) = \bar{\mathbf{A}}\mathbf{Z}(K) + \bar{\mathbf{B}}\Delta \mathbf{u}(k) \quad (36)$$

其中,适用模型式(14)的系数为

$$\bar{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} I & -C & 0 & 0 & 0 \\ 0 & A & A_d & 0 & B_d \\ 0 & 0 & 0 & I & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \bar{\mathbf{B}} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ I \end{bmatrix} \quad (37)$$

由上几式,最优控制律被应用于模型式(14),其形式为

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{u}(k) = & -\mathbf{K}_1 \Delta \mathbf{x}(k) - \mathbf{K}_2 \mathbf{e}(k) \\ & - \sum_{i=1}^2 \mathbf{K}_p(i) \Delta \mathbf{x}(k-i) \\ & - \sum_{j=1}^1 \mathbf{K}_d(j) \Delta \mathbf{u}(k-j) \end{aligned} \quad (38)$$

参数同式(30)~式(33)。

在控制律式(38)的作用下,模型式(14)可以实现对无线通信网络功率和速率的定值跟踪。

3 仿真结果

为了验证所提出的功率和速率最优跟踪控制算法的有效性和最优性,下面应用 SIMULINK 对所提算法进行计算机仿真。仿真参数取为: $c_1 = c_2 = 0.5$, $\lambda = 2\text{ms}$, $\tau = 1\text{ms}$, $\mu = 0.8$, $\alpha = 0.2$, $b_p = b_f = 1$, $n(k)$ 和 $d(k)$ 是均值为 0、方差为 0.01 的白噪声。 $\mathbf{R}$ 为单位阵,期望信噪比取为 100dB,期望速率取为 50。仿真结果如图 1 ~ 图 4 所示。图 1 和图 2 为系统的输出跟踪曲线,图 3 和图 4 分别为系统的功率和速率控制曲线。由图可以看出,本文所提出的控制算法具有很好的控制性能和输出跟踪性能。

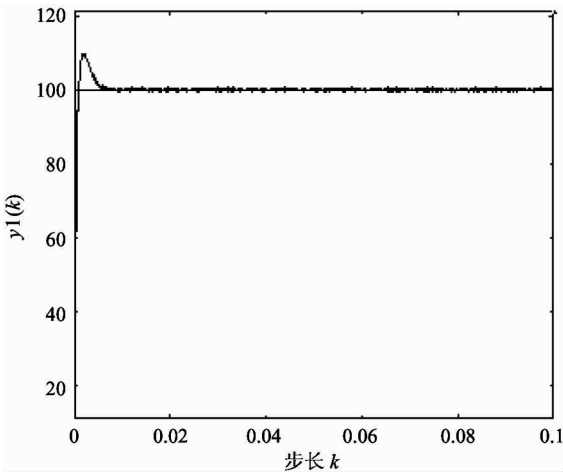


图 1 实际信噪比 $y_1(k)$ 跟踪期望信噪比

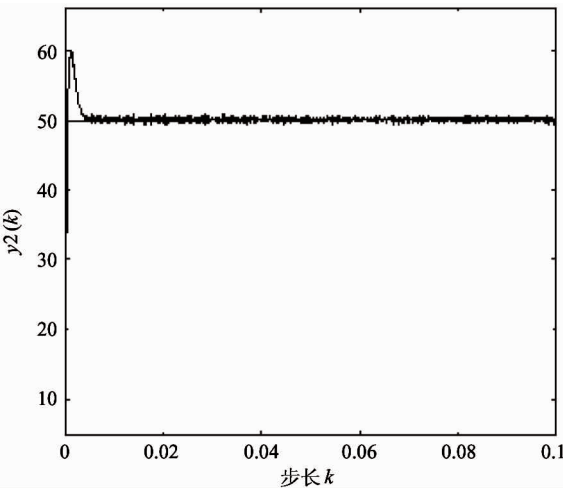


图 2 实际速率 $y_2(k)$ 跟踪期望速率

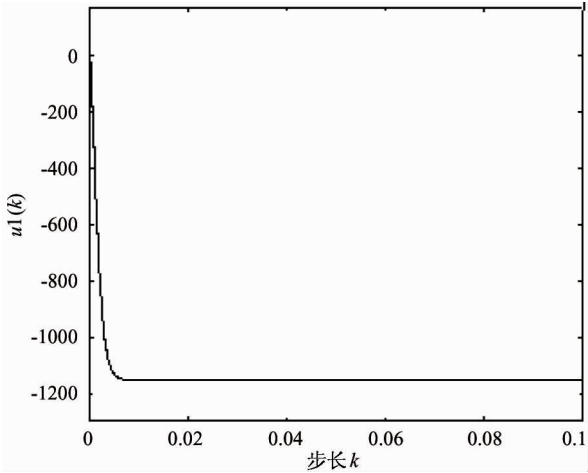


图 3 功率控制量

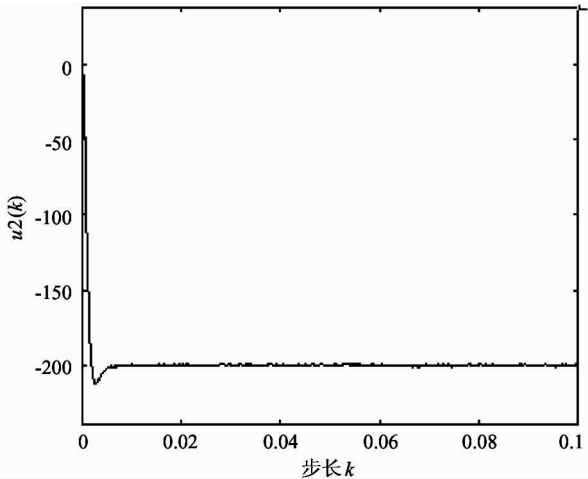


图 4 速率控制量

为了突出本文算法的最优性,作为比较,对系统式(14)应用PID算法进行了仿真,图5和图6是PID算

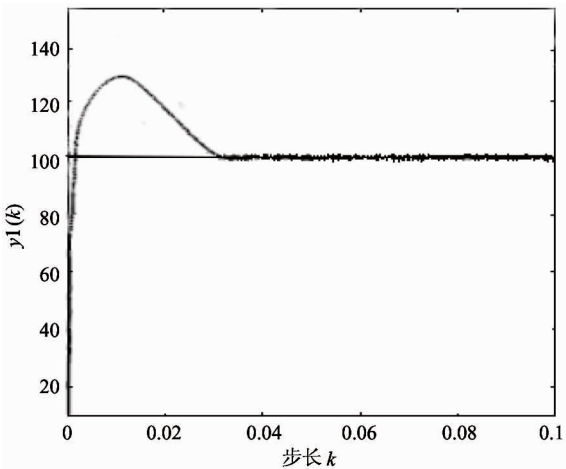


图 5 PID 算法实现实际信噪比跟踪期望信噪比

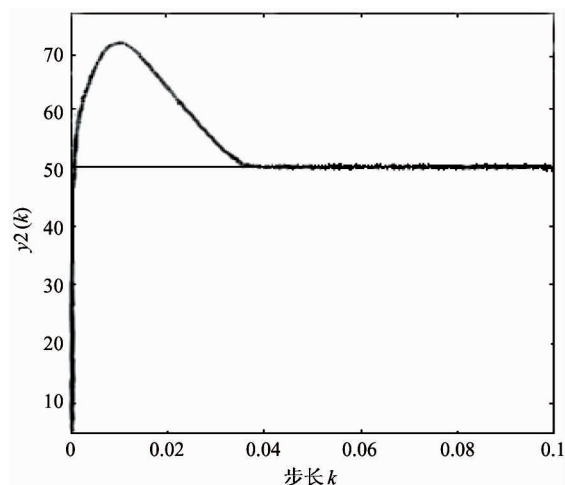


图 6 PID 算法实现实际速率跟踪期望速率

法的跟踪效果图。由图可见,本文所用的最优跟踪控制律最终实现跟踪时的超调量远远小于 PID 跟踪算法的超调量,另外,本文提出的最优控制算法实现完全跟踪的时间远远小于 PID 跟踪算法所用时间。由此可见,相较于 PID 算法,本文所使用的算法在多时滞的系统跟踪控制问题上有其独特的优越性,对于参考信号的跟踪效果明显优于 PID 跟踪算法。

4 结 论

本文首先从控制理论出发,建立了包含状态时滞 λ 和输入时滞 τ 的多时滞的无线通信网络系统模型;然后,基于最优控制理论,研究了多时滞模型的一般形式的时滞补偿方法,并将该方法应用在本文提出的多时滞模型中,提出了针对多时滞模型的最优跟踪算法,通过求解矩阵黎卡提代数方程,得到最优功率和速率控制律;最后,对最优控制算法进行了计算机仿真。仿真结果表明,所提出的最优控制算法对多时滞的无线通信网络功率和速率具有很好的控制性能。

本文的主要创新之处在于,在建立无线通信网络功率和速率控制系统的数学模型时,根据实际的网络情况,引入了不同的状态时滞 λ 和输入时滞 τ ,并研究了这种多时滞系统的补偿算法,从而实现最优跟踪。然而,在实际网络当中,时滞并不是一直不变的,本文并没有考虑状态时滞和输入时滞的时变性,也没有考虑参数不确定的问题,但这些问题在实

际网络当中有着很大的影响,因此,下一步,将围绕这些问题,对无线通信网络的功率和速率控制进行更深入的研究。

参考文献

- [1] Han C W, Sun D H, Bi S, et al. Modeling and model predictive power and rate control of Wireless Communication Networks. *Journal of Applied Mathematics*, <http://dx.doi.org/10.1155/2014/642673>, 2014
- [2] Ahmad A, Ul Hassan N, Assaad M, et al. Joint power control and rate adaptation for video streaming in wireless networks with time-varying interference. *IEEE Trans on Vehicular Technology*, 2016, 65(8): 6315-6329
- [3] Han C W, Chang S R, Diao Q, et al. Optimal power and rate control for wireless communication networks with external disturbance. In: *Proceedings of the 28th Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, Yinchuan, China, 2016. 5592-5595
- [4] Subramanian A, Sayed A H. A robust power and rate control method for state-delayed wireless networks. *Automatica*, 2005, 41(11): 1917-1924
- [5] Subramanian A, Sayed A H. Joint rate and power control algorithms for wireless networks. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2005, 53(11): 4204-4214
- [6] Kong S L, Zhang H S, Zhang Z S, et al. Joint predictive control of power and rate for wireless networks. *Acta Automatica Sinica*, 2007, 33(7): 761-764
- [7] Han C W, Zhang X T, Liu L, et al. Nonlinear power and rate control for wireless networks. In: *Proceedings of the 12th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA)*, Guilin, China, 2016. 1943-1948
- [8] Chai C C, Tjhung T T, Leck L C. Combined power and rate adaptation for wireless cellular systems. *IEEE Trans Wireless Communications*, 2005, 4(1): 6-13
- [9] Kim S W, Lee Y H. Combined rate and power adaptation in DS/CDMA communications over Nakagami fading channels. *IEEE Trans Communications*, 2000, 48(1): 162-167
- [10] Mo R, Chen Y H, Chai C C. Capacity of DS/CDMA system under multipath fading with different adaptive rate adaptive power schemes. In: *Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, New Orleans, USA, 2003. 190-195

- [11] Bahaei M S, Kinggue M M, Charbit G. Joint optimisation of outer-loop power control and rate adaptation over fading channels. In: Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference, Rhodes, Greece, 2004. 26-29
- [12] Fonda J W, Jagannathan S, Watkins S E. Joint adaptive distributed rate and power control for wireless networks. In: Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Singapore, 2008. 3216-3221
- [13] Moller A, Jonsson U T. Stability of rate and power control algorithms in wireless cellular networks. In: Proceedings of the Joint 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference, Oriando, USA, 2011. 4535-4541
- [14] Chen Y L, Lin Y S, Wang J W, et al. Adaptive fuzzy-based rate management and power control in multimedia CDMA cellular systems. *Computer Communications*, 2008, 31(10): 1901-1910
- [15] Zhao L, Mark J W. Joint rate and power adaptation for radio resource management in uplink wideband code division multiple access systems. *IET Communications*, 2008, 2(4): 562-572
- [16] 潘颖,王超,蔡国平. 线性时滞系统的离散最优控制. 计算力学学报, 2004, 21(2): 177-184

Optimal power and rate tracking of wireless communication networks with multiple time delay

Han Cunwu, Chang Shurui, Diao Qi, Liu Lei

(Beijing Key Laboratory of Fieldbus Technology and Automation,
North China University of Technology, Beijing 100144)

Abstract

The hot problem of the power and rate control of wireless communication networks was investigated. In view of the fact that traditional power and rate control methods for wireless communication networks do not simultaneously consider the state delay and the input delay, so the existing algorithms for power and rate control can not guarantee the networks' optimal output tracking performance, a new model for wireless communication networks was reestablished under considering of multiple time delay, thus a model for power and rate control containing different state delay and input delay was obtained. And then, an optimal power and rate tracking algorithm for wireless communication networks with multiple time delay was presented, which can guarantee the optimal output tracking performance of the networks. Finally, the algorithm was simulated through the Simulink software. The simulation results show that the proposed algorithm has the good control performance.

Key words: wireless communication networks, transmission delay, multiple time-delay system, power control, rate control, optimal tracking