



一种基于最优控制的网络管理整体策略

柴 智

(中国联合网络通信股份有限公司天津分公司 天津 300052)

摘 要:随着当前运营商所运营接入网络制式的不断发展,网络管理的负担大大增加,网络管理变得更加频繁。在这种情况下,网络管理不能只保证网络系统处于良好状态,需要同时保证网络状态调整的过程最优。从控制论的角度研究了这一问题,基于最优控制理论提出了最优化网络管理方法。本文的研究成果已经在天津联通的接入网络中得到了证实,相关研究对自动控制理论与网络管理的相关研究有着十分重要的意义。

关键词:网络管理;控制论;最优控制

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2015303

Network Management Method Based on Optimal Control

Chai Zhi

(Tianjin Branch of China United Network Communications Co., Ltd., Tianjin 300052, China)

Abstract: With the development of access network technology, the burden of network management has greatly increased, and became more frequent. In such case, the network management will not only make the network system in good condition, but also need to make sure that the adjustment process of network is optimized. From the viewpoint of cybernetics, the problem in network management was studied. Based on optimal control theory, a method to optimize network management was proposed. The research results have been verified in Tianjin Unicom's network management system, the research on automatic control theory in network management will take important influence in this field.

Key words: network management, cybernetics, optimal control

1 引言

随着通信技术的快速发展,通信网络的规模不断扩大,网元间的关联不断增强。当前的通信网络已经成为一个异常复杂的动力学系统。为了保证网络运行的稳定性和服务质量,需要持续对网络进行控制,使得网络系统始终处于良好的状态。为此,在通信网络的不同层次上,深入研究了相关的控制技术,如在接入层中的功率控制、接纳控

制、汇聚层中的拥塞控制、流量控制,传输层中的路由机制、资源分配等。不难看到,网络保障其本质就是在不同层面上实施的控制。

在运营商的实践中,网络管理主要集中在对具体场景、具体过程的研究。其目的主要是找到系统达到某一最优表现时,网络参数的取值。在实践中,这种方法面临以下两个重要问题:

- 网络参数之间常常存在较大的相互影响,在管理网

收稿日期:2015-07-28;修回日期:2015-11-04

论文引用格式:柴智. 一种基于最优控制的网络管理整体策略. 电信科学, 2015303

Chai Z. Network management method based on optimal control. Telecommunications Science, 2015303



络时,需要进行折中考虑,即对网络的有效控制不仅仅是设置一个参数,需要综合考虑各方面的影响,进行全面考虑,获得最优的网络设置。

- 网络管理是一个持续进行的过程。对于一个控制过程,其所需考虑的是“过程”最优,即考虑控制所花费时间、消耗代价等因素,而不仅仅考虑每次控制后所得到的效果。

通信网络的本质就是实现信息传递的一种有效组织过程。从根本上讲,对整个信息传递的过程进行有效控制是网络保障所需解决的核心问题。作为一个典型的控制问题,当前还较少有基于控制论所做的相关研究。本文以此为出发点,以控制论的思想为基础,研究通信网络中的管理和保障问题,相关研究将为运营商网络管理工作提供坚实的理论基础,同时也将大大提升网络保障的效果。

2 网络管理的最优控制模型

通信网络是一个受控的信息传递网络。可以将通信网络的管理问题归纳为:对某个受控的通信网络系统或通信过程,找出一个最优的控制方案,使得此通信系统或通信过程由初始状态转移到所设定的目标状态时,整个过程的性能指标为最优。在这种情况下,最优化的就不是某个参数,而是网络状态空间中的一条轨线(函数)。可见,优化问题已经成为函数的函数,即泛函,需要利用控制论的最优控制理论求解泛函的最优化问题。

具体而言,一个通信网络的状态方程可以表示为: $\dot{x}(t) = f[x(t), u(t), t], x(t_0) = x_0$ 。其中, $x(t) \in X \subset R^n$ 为状态向量, X 为状态向量的取值范围; $u(t) \in U \subset R^m$ 为控制向量, U 为控制向量的取值范围。对于通信网络保障,其目标是确定一个最优控制过程 $u^*(t)$ 以及最优状态轨线 $x^*(t)$, 使得通信网络从初始状态 $x_0(t)$ 向目标 $\Psi[x(t_e), t_e] = 0$ 转移,同时使得网络达到的性能指标最优。

从数学角度看,上述问题可以看作求解带有约束条件的泛函极值问题。对于一个受控的通信过程,其可以采用微分方程将这一问题描述为:

$$\begin{aligned} \min \quad & J = \varphi[x(t_e), t_e] + \int_{t_0}^{t_e} L[x(t), u(t), t] dt \\ \text{s.t.} \quad & f(x, u, t) - \dot{x}(t) = 0, \quad x(t_0) = x_0, \quad \psi[x(t_e)] = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

从式(1)可以看出,网络管理的目标是使得经过调整的网络 t_e 的最终状态 $\varphi[x(t_e), t_e]$ 最优,同时还需要保证系统

在状态调整过程 $t_0 \rightarrow t_e$ 中 $\int_{t_0}^{t_e} L[x(t), u(t), t] dt$ 最优,为了实现
对网络管理过程的综合考虑,引入泛函 J 对网络管理过程进行描述。

为了实现最优的网络控制,需要对上述有约束的泛函求极值,本文采用拉格朗日乘子法。引入拉格朗日乘子向量 γ 和 $\lambda(t)$,构造泛函如下:

$$J = \varphi[x(t_e)] + \gamma \psi[x(t_e)] + \int_{t_0}^{t_e} [L(x(t), u(t), t) + \lambda^T(t)[f(x, u, t) - \dot{x}(t)]] dt \quad (2)$$

通过上述推演,将一个多变量约束的最优化问题转化为一个无约束最优化问题,从而可以采用传统基于变分法的无约束方式求解,对上述泛函进行一次变分:

$$\begin{aligned} & \delta J(x, \delta x, \dot{x}, \delta \dot{x}, \lambda, \delta \lambda) \\ &= \int_{t_0}^{t_e} \left[\frac{\partial}{\partial x} g^T(x, \dot{x}, t) \delta x + \frac{\partial}{\partial \dot{x}} g^T(x, \dot{x}, t) \delta \dot{x} \right] dt + \\ & \int_{t_0}^{t_e} \left\{ \lambda^T(t) \left[\frac{\partial}{\partial x} f(x, \dot{x}, t) \delta x + \frac{\partial}{\partial \dot{x}} f(x, \dot{x}, t) \delta \dot{x} \right] + \right. \\ & \left. f^T(x, \dot{x}, t) \delta \lambda \right\} dt \quad (3) \end{aligned}$$

由变分定理知,网络状态变化过程的最优轨线 $x^*(t)$ 应满足的必要条件为:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} L(x^*, \dot{x}^*, \lambda^*, t) - \frac{d}{dt} \left[\frac{\partial}{\partial \dot{x}} L(x^*, \dot{x}^*, \lambda^*, t) \right] = 0 \\ f(x^*, \dot{x}^*, t) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

以上给出了网络管理最优实现的基本思想,即通过将网络作为一个受控系统,基于控制理论将网络管理所希望达成的目标,转化为对一个有约束的泛函进行最优化求解。在此过程中,一方面,可以将网络管理中需要满足的各种目标在系统最终状态中进行统一体现;另一方面,对于网络调整的“过程”进行了优化,从而实现了更为合理的网络控制。

3 基于最优控制的网络管理方法

如前文所述,基于最优控制的网络管理方法可以合理地实现网络状态调整,确保网络状态调整的过程也是最优的。在通信网络中,由于网络的状态调整会经常发生,提升网络状态调整过程的性能对于优化整个网络性能有极为重要的意义。本文基于网络的这一特点,对接入网常见的管理问题展开分析。

在移动通信系统中,用户的随机移动加之无线信道时变的特性,造成无线传输信道会常常发生快速变化。为了

保证小区覆盖边缘上的用户尽可能少地受到相邻小区的影响,需要不断对基站的发射功率进行控制。另一方面,发射功率时域上的快速变化,会在频域上产生一个宽频带谐波干扰,对小区用户的通信产生负面影响。因此,功率控制不仅需要快速进行,同时还需要减轻 EMI,保证功率变化曲线“圆滑”而不出现“突变”。

例如, LTE 下行业务信道(PDSCH)的发射功率需要根据用户信道质量进行调整,如何在调整发射功率的同时,减少“功率调整”这一过程带来的射频干扰显得十分重要。设基站的发射功率为 $x(t)$, 基站发射功率的控制量 $u(t)=\dot{x}(t)$, 基站初始的发射功率 $x(t_0)=P_0$, 调整的目标发射功率为 $x(t_e)=P_e$ 。由于 EMI 具体机制十分复杂,本文对此进行简化,认为 EMI 仅与功率变化速度的平方 $u^2(t)$ 有关。最后,在进行功率控制时,假设花费时间与产生 EMI 具有同样的权重,对于从 $t_0 \rightarrow t_e$ 时刻的整个控制过程,该问题可以写为:

$$\begin{aligned} \min J = t_e + \int_{t_0}^{t_e} u^2(t) dt \\ \text{s.t. } x(0) = P_0, x(t_e) = P_e \end{aligned} \quad (5)$$

注意到,该问题并没有对控制过程的结束时间做出显式的要求,即控制过程的持续时间也是优化的变量,因此式(5)所述问题是一个终端自由的最优化问题,构造哈密顿函数如下:

$$H = u^2(t) + \lambda(t)u(t) \quad (6)$$

协态方程为: $\lambda^*(t) = \frac{\partial H}{\partial x} = 0$, 控制方程为: $\frac{\partial H}{\partial u} = 2u^*(t) + \lambda^*(t) = 0$, 从而可以得到 $\lambda^*(t) = a, u^*(t) = -0.5a$ 。

由初始状态方程以及初始条件可得: $x^*(t) = P_0 - at$, 再由 $x^*(t_e) = P_e$ 得 $at_e = P_0 - P_e$ 。该问题是终端自由的最优化问题,则哈密顿函数在 t_e 处满足如下条件:

$$H(t_e) = u^2(t_e) + \lambda(t_e)u(t_e) = -\frac{\partial \varphi}{\partial t_e} = -1 \quad (7)$$

求解式(7)可得 $a = \pm 2$ 。时间非负性 $t_e > 0$, 因此 a 与 $P_0 - P_e$ 同号。假设 $P_0 - P_e > 0$ 则 $a = 2$, 得到最优解 $u^*(t) = -0.5a = -1$ 。这一结果根据网络管理中对于过程时间和电磁干扰的重要性权重不同而改变。

本文对上文所得的功率控制进行了仿真。设开始功率 $P_0 = 0$, 而终端功率分别为 $P_e = 5 \text{ W}$ 和 $P_e = 3 \text{ W}$ 。对应的功率控制的耗时分别为 $t_e \approx 5.1 \text{ s}$ 、 $t_e \approx 4.3 \text{ s}$, 即实现了终端自由的控制, 最终得到的功率控制过程如图 1 所示。从图 1 中可见, 功率调整的过程出现了明显的“缓坡”, 这是由提高稳

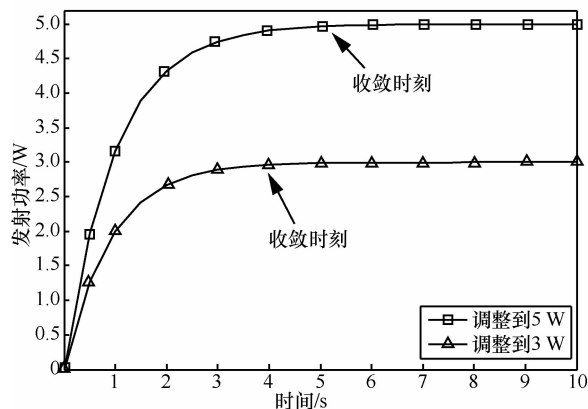


图1 最优网络功率控制过程

定性而降低系统反应时间所致,即对于一个受控系统,系统稳定性和响应需要折中。

目前,各类标准中对于如何进行功率调整没有明确规定,仅对功耗调整的最大步长有所要求。在这种情况下,基于控制论的思想找到一种符合网络管理实际需求的控制方案,以确保功率控制过程的最优可以显示出十分重要的意义。

对比本文所提方案与线性功率控制所造成的电磁干扰,对比结果如图 2 所示。可以看到,采用本文所提方案可以有效减少电磁干扰,从而实现功率控制的最优控制。本文对于电磁干扰的计算还不够精确,但可以看到,本文的相关工作将对网络管理领域带来很大的启发和借鉴作用。

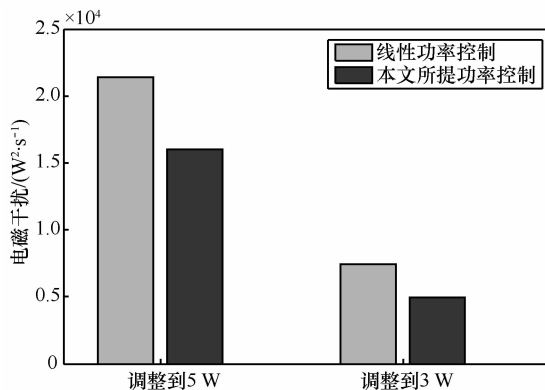


图2 功率控制的结果对比

4 方案实践与验证

基于本文研究成果,中国联合网络通信股份有限公司天津分公司(以下简称天津联通)对中国联通集团公司“面向业务质量和客户感知的运维转型”工作中的网络支撑系统进行了升级,基于最优控制思想优化了传统网络管理方法,不仅提升了网络性能,还降低了网络管理的时间和经

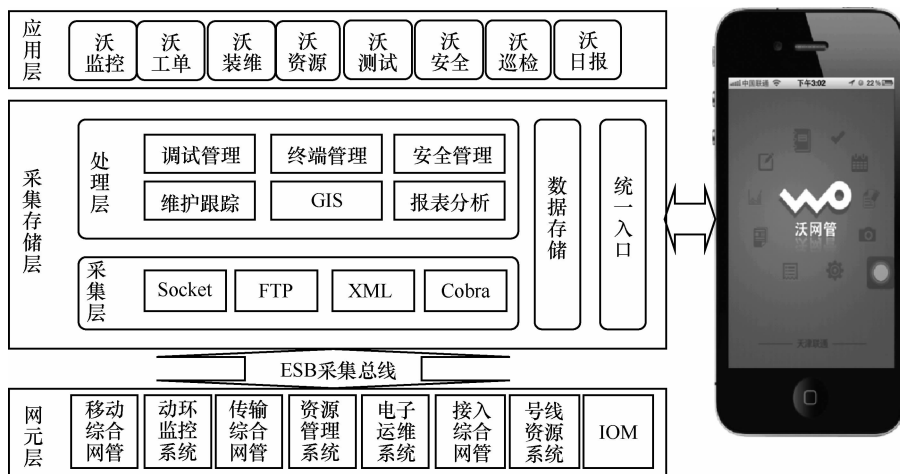


图3 天津联通网络管理系统构架

济成本,取得了较为明显的成果,改进后的网络管理系统框架如图3所示。

为了实现本文所提出的网络最优控制,天津联通在梅江局部署ESB统一采集共享总线,实现全网OSS/BSS数据接口的“一次部署、集中采集、统一分发”。同时,在卫津南路局部署“掌上沃”网管所需的基于Hadoop的大数据统一控制平台。为了保证系统控制的实时性,系统全部设备实现时间服务器的NTP统一网络授时,保证新建网管系统与现有OSS/BSS运行设备时间同步。

截至目前,该系统管理维护单元已有逾50个,仪表2000余台套。2015年1-3月资源核查站点数达到13195个,累计核查设备43.6万端。累计处理各专业告警800万条,形成精准故障定位工单2000条,其中:通过对基站断站故障原因的精准定位,减少动力设备引起的基站断站次数,降幅达43%,断站次数由2014年的0.29次下降到0.19次,平均断站时长由84.98 min下降到32.36 min;累计派发测试请求117816次,满足了一线运维及代维人员对网络管理的即时需求,实现了全市重点局房标准化巡检和20万条资产移动化管理。

从实践结果看,本文所提出的基于最优控制的网络管理方案可以有效提升网络性能,减少操作过程对网络造成的各种影响。本文所提出的方案可以在不增加额外投入的情况下,优化现有网管系统的性能,减少人力和物力投入,对运营商的网络运营工作有十分重要的意义。

5 结束语

随着网络规模的扩大和通信技术的发展,网络管理工作也面临越来越多的挑战。本文基于最优控制理论在

网络管理中的相关理论和应用进行了研究,基于控制论的思想,实现了对于网络状态管理更好的管理和控制。本文的研究成果已经在天津联通的实际网络中进行了应用并取得了较好的效果。可以看到,随着最优控制理论与通信领域的相互融合,将对网络管理甚至整个通信领域产生深远的影响。

参考文献

- 1 Athans M A, Falb P L. Optimal Control. New York: McGraw-Hill, 1966
- 2 李传江, 马广富. 最优控制. 北京: 科学出版社, 2011
Li C J, Ma G F. Optimal Control. Beijing: Science Press, 2011
- 3 Sethi S P, Thompson G L. Optimal Control Theory: Applications to Management Science and Economics (2nd Edition). Berlin: Springer, 2000
- 4 谢希仁. 计算机网络(第五版). 北京: 电子工业出版社, 2009
Xie X R. Computer Networks (5th Edition). Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009
- 5 Bambos N D, Chen S C, Pottie G J. Radio link admission algorithm for wireless networks with power control and active link quality protection. Proceedings of INFOCOM'95, Boston, MA, USA, 1995

[作者简介]



柴智,男,中国联合网络通信股份有限公司天津分公司网络管理中心经理、工程师,主要研究方向为智能OSS关键技术、移动互联网恶意程序监测关键技术。