

基于 EMD 的单通道盲源分离跳频通信抗干扰方法

齐扬阳^{1,2} 于 淼²

(解放军理工大学通信工程学院 南京 210007)¹ (南京电讯技术研究所 南京 210007)²

摘 要 针对传统盲源分离算法无法在单路接收的跳频通信场景中使用的问题,提出一种结合经验模态分解的单通道盲源分离跳频通信抗干扰方法。首先通过理论分析和仿真确定了采用 EMD 对混有干扰的单路接收跳频信号进行增维的方法,将单通道盲源分离的欠定问题转为正定问题,之后分别利用全盲盲源分离和半盲盲源分离实现扰信分离。在不同信干比、不同信噪比等多种条件下的仿真实验验证了本方法的有效性。

关键词 跳频通信,单通道盲源分离,经验模态分解,半盲盲源分离

中图分类号 TN911.7 文献标识码 A DOI 10.11896/j.issn.1002-137X.2016.1.034

Anti-jamming Method for Frequency Hopping Communication Based on Single Channel BSS and EMD

QI Yang-yang^{1,2} YU Miao²

(Institute of Communication Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)¹

(Nanjing Telecommunication Technology Research Institute, Nanjing 210007, China)²

Abstract Traditional blind source separation (BSS) methods can not be used in frequency hopping communication system with only one antenna equipped. To deal with this problem, a single channel BSS anti-jamming method based on empirical mode decomposition (EMD) was presented. Firstly, the signal received by single channel is expanded by EMD according to theoretical analysis and the simulation results, transforming the single channel underdetermined problem into the multi channel positive definite one. Then the totally-blind and semi-blind BSS algorithm are employed respectively to realize the separation of the signal and the jamming. Simulations were carried out under different signal to jamming ratio and signal to noise ratio to demonstrate the superior performance of the proposed method.

Keywords Frequency hopping communication, Single channel blind source separation, Empirical mode decomposition, Semi-blind source separation

1 引言

跳频扩谱(Frequency Hopping Spread Spectrum, FHSS)通信是目前通信抗干扰领域应用范围最广的一种通信方式^[1]。但是,假如干扰方施放的阻塞干扰带宽超过跳频带宽的 1/3,跳频通信效果将严重恶化。传统做法主要通过改变频率表、增加跳频带宽、增加功率等增效措施来应对,但是频谱资源的有限性限制了上述措施的使用,需要探索新的方法来进一步提升跳频通信抗干扰的能力。

盲源分离(Blind Source Separation, BSS)是指在源信号和混合通道参数完全未知或仅有少量先验信息的情况下,仅利用混合观测信号对源信号及混合通道参数进行估计的理论与技术^[2]。先期研究表明,利用盲源分离抗干扰,可以实现通信信号和部分频带阻塞干扰信号的有效分离,能够在不增加频谱带宽的条件下,进一步提升跳频通信的误码性能^[3]。但是,传统多通道盲源分离技术要求接收传感器数目不少于源信号数目,限制了其在一些仅部署单根天线的场合的应用。单通道盲源分离,旨在仅利用单路混合接收信号实现对源信

号的分离或抽出,有望增强盲源分离的实用性,具有重要的理论价值和实际意义。

目前解决单通道盲源分离问题的主流算法是粒子滤波(Particle Filtering, PF)方法^[4]和逐幸存路径(Per-Survivor Processing, PSP)方法^[5],主要思想是将信号分离问题转换为状态空间模型中对通信码元和未知参数进行联合估计的问题,但是粒子滤波算法实现复杂,难以应用到实际装备当中,PSP 算法对信道响应初值设置的准确性要求很高,不能在较低信噪比下获得满意的分离效果^[5],还有一类是伪 MIMO (Multiple-Input and Multiple-Output)的方法^[6],它的思想是首先通过某种手段对单路混合信号进行增维处理,使之映射出虚拟多路观测信号,从而将极端欠定问题转化为适定或超定问题,然后再利用成熟的多通道盲源分离方法进行分离。

1998 年,美国华裔科学家 N. E. Huang 等人^[7]提出了经验模态分解方法(Empirical Mode Decomposition, EMD)。因为 EMD 具有将一维信号分解为多路 IMF 的增维特性,所以广大学者们对其和盲源分离的结合展开研究,将其作为伪 MIMO 映射预处理模块,使得多通道的传统盲源分离算法在

到稿日期:2015-01-29 返修日期:2015-04-25 本文受国家自然科学基金项目(61179006),江苏省基础研究计划(BK20141068)资助。

齐扬阳(1989—),男,硕士,主要研究方向为盲信号处理、无线通信抗干扰技术,E-mail:jimmy_qi@yeah.net;于 淼(1975—),男,博士,高级工程师,主要研究方向为盲信号处理、无线通信抗干扰技术,E-mail:wordflying@hotmail.com。

欠定场景中也能够得到应用。B. Mijovic^[8]等利用经验模态分解对单传感器记录的心音信号进行分解,在得到的一组IMF分量中,利用先验知识主观选择包含目标信号成分的固有模态分量,与单路接收信号组成新的多维信号,再利用传统的多通道盲源分离算法实现分离。刘佳等^[9]依据同样的思想,提出一种单通道地声信号分离方法,以期在复杂的地声背景干扰下提高接收信噪比,但是在分离与目标频率接近的线谱干扰时,该方法效果一般。文献[10]指出,在GPS直扩信号遭遇扫频干扰时,对单路接收信号进行EMD分解,GPS信号的成分分量将分布于每一个经验模态函数中,利用盲源分离算法可将其“提取”出来。总的来说,目前基于伪MIMO的单通道盲源分离方法大多针对神经信号和地声信号等低频信号,对通信信号的研究相对较少,特别是在跳频通信场景中如何利用EMD构建伪MIMO矩阵,进而实现单通道扰信盲分离的研究,尚未见到公开报道。

本文首先根据理论分析和仿真结果确定了一种利用EMD对混有干扰的单路接收跳频信号进行增维的方法,进而提出一种基于EMD的单通道盲源分离跳频通信抗干扰方案,以期单通道盲源分离跳频通信抗干扰提供新的思路。

2 基本原理

2.1 盲源分离原理

以瞬时线性混合模型为例进行说明。设 p 个传感器的观测信号 $x(t)$ 是来自 q 个源信号 $s(t)$ 的线性混合,并包含了加性高斯噪声 $v(t)$ 。为简单起见,忽略时间 t ,有 $\mathbf{X}=\mathbf{A}\mathbf{S}+\mathbf{v}$ 。其中 $\mathbf{X}=(x_1, x_2, \dots, x_p)^T$ 为 p 维的观测信号, $\mathbf{S}=(s_1, s_2, \dots, s_q)^T$ 为 q 维相互独立的源信号, $(\cdot)^T$ 表示矩阵的转置, \mathbf{A} 为 $p \times q$ 维的混合矩阵, \mathbf{v} 为服从 $N(0, \sigma^2)$ 分布的高斯白噪声。

若噪声可以忽略,即 $\mathbf{X}=\mathbf{A}\mathbf{S}$ 且 \mathbf{A} 是可逆的方阵(即 $p=q$),则盲源分离算法可以根据一定目标函数来估计出一个分离矩阵 $\mathbf{W} \approx \mathbf{A}^{-1}$ 使得估计信号 $\hat{\mathbf{S}}=\mathbf{W}\mathbf{X} \approx \mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{A}\mathbf{S}=\mathbf{S}$ 接近真实的源信号^[6]。

将对源信号完全未知的盲源分离称为全盲盲源分离。而实际情况中,往往能够对目标信号有一定的先验知识,可以利用先验信息构造约束条件,将全盲的无约束最优化问题转换为约束最优化问题。Lu等人^[11]首次给出了半盲盲源分离的理论框架,并提出了带参考信号的独立分量分析算法^[12],该算法可以采用与源信号相同或相近的参考信号,进而以参考信号和目标信号之间的相似性函数来指导迭代寻优,实现目标信号的定向抽取,而不是全部分离。相比全盲盲源分离,其提高了算法精度,同时在空间复杂度上也具有明显优势。

根据中心极限定理,可以将非高斯性当作是否实现成功分离的判定函数,从而引导分离矩阵的动态寻优。以非高斯性为目标函数的ICA-R算法框图如图1所示。

图1中, $\hat{s}_i(t)$ 为待分离的目标分量 $s_i(t)$ 的估计输出, $r(t)$ 为包含待分离目标分量 $s_i(t)$ ($i=1, \dots, q$)先验信息的参考信号, $\epsilon(s, r)$ 为输出信号 $y(t)$ 和参考信号 $r(t)$ 的相似性函数,在ICA-R算法中作为估计分离向量 w^* (分离矩阵 \mathbf{W} 的一行)的约束条件,使输出信号 $\hat{s}_i(t)=w^{*T}x(t)$ 为待跟踪目标

信号 $s_i(t)$ 的估计。

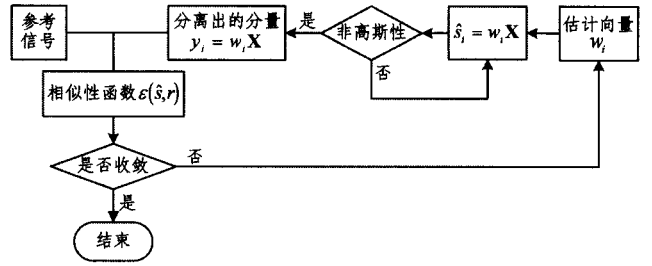


图1 ICA-R 算法框图

以上讨论的是传统的多通道盲源分离,只适用于 $p \geq q$ 的正定或超定的场合,但在实际中, $p < q$ 的欠定场景甚至 $p < q$ 且 $p=1$ 的单通道场景广泛存在。在 $p < q$ 的场景中,由于混合矩阵的逆不存在,这时即使混合矩阵已知,也存在无穷多个解,需要借由一些伪MIMO映射技术将单路接收信号增维,使之满足传统多通道盲源分离算法的使用条件。

2.2 经验模态分解原理

经验模态分解是一种完全由数据驱动的自适应非线性时变信号分解方法,能够将非平稳信号或非线性信号分解成为一系列平稳、线性的本征模函数(Intrinsic Mode Function, IMF),从而实现从一路信号至多路信号的映射。经验模态分解的步骤如下^[13]:

(a)找到信号所有的局部极大值点和局部极小值点。连接所有局部极大值点拟合出信号上包络线 $u(t)$,连接所有局部极小值点拟合出信号下包络线 $l(t)$ 。

(b)计算上包络线和下包络线的平均值 $m_1(t)$, $m_1(t) = (u(t) + l(t))/2$ 。

(c)信号 $x(t)$ 和 $m_1(t)$ 的差即为第一个分量 $h_1(t)$, $h_1(t) = x(t) - m_1(t)$ 。

(d)在理想情况下, $h_1(t)$ 应该满足IMF的定义,若不满足,则需要不断进行上述筛选过程,经过 k 步上述过程后得 $h_{1,k}(t) = h_{1,k-1}(t) - m_{1,k}(t)$,如果 $h_{1,k}$ 和 $h_{1,k-1}$ 之间的差别足够小,则 $h_{1,k}(t)$ 可视为一个IMF。当差别足够小时,可记 $h_{1,k}$ 为第一个IMF,记为 c_1 。

(e)将 c_1 从 $x(t)$ 中提取出来,记 $r_1 = x(t) - c_1$ 。

(f)将 $r_1(t)$ 作为信号重复上述步骤,可以得到 $x(t) = \sum_{j=1}^n c_j(t) + r_n$, r_n 为余项。

由上式可以看出,EMD能够将一路信号分解为多路IMF,且每一路IMF与原信号等长,将IMF加和即可实现原信号的重构。

综上,EMD的分解与重构的灵活性使其成为实现伪MIMO映射的有力工具。下面将EMD和多通道盲源分离算法相结合,探索基于EMD的单通道盲源分离跳频通信抗干扰方法。

3 基于经验模态分解的单通道盲源分离跳频通信抗干扰方法

3.1 算法分析

基于经验模态分解的单通道盲源分离跳频通信抗干扰方法的系统框图如图2所示。

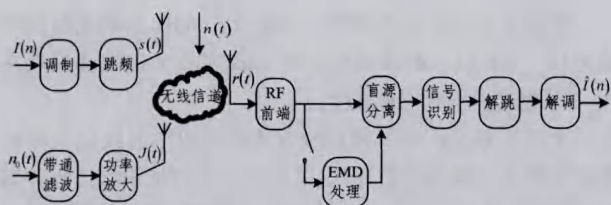


图2 基于EMD的单通道盲源分离跳频通信抗干扰方法系统框图

假设通信方正在进行点对点的跳频通信,信息序列 $I(n)$ 经调制、跳频后,形成跳频信号 $s(t)$,干扰方侦测到 $s(t)$ 后,根据跳频带宽施放阻塞干扰。接收端经 RF 前端采样后得到单路接收信号 $r(t)$,可表示为: $r(t) = as(t) + bJ(t) + n(t)$ 。其中, a 和 b 为混合系数, $n(t)$ 为加性高斯噪声。将 $r(t)$ 送入 EMD 处理单元。

由于通信信号与语音信号、神经信号的特性不完全相同,因此理论上,低频信号处理中利用 EMD 构建虚拟观测信号的方法对通信信号难以直接使用。同时仿真结果也表明,EMD 处理通信信号和干扰信号的混合接收信号效果得到的多路固有模式分量中,得到的第一个高频 IMF 分量可能覆盖很宽的频率范围,而并不是单分量信号;第二路以后的固有模式分量均发生频率畸变,可能是虚假分量,无法使用。

结合仿真结果,提出一种利用 EMD 实现跳频通信信号增维的新方法。所提方法的主要思想是当跳频通信遭遇强干扰时,开始对 $r(t)$ 进行逐跳 EMD 分解,保留每次分解得到的第一路 IMF,累积 t_1 时间后,对第一路 IMF 的加和除以 t_1 时间内的跳数,取平均得到 $\hat{r}(t)$ 。将 $\hat{r}(t)$ 固定作为虚拟观测信号,与之后的逐跳实时信号组成伪 MIMO 矩阵,重新满足了盲源分离的理论模型,送入盲源分离单元进行处理,如图 3 所示;同时,与一次进行整段语音或神经信号的分离的处理方法不同,本文利用跳频通信特点,采用逐跳分离的方法,即每一跳都将实时接收信号和虚拟观测信号组成的伪 MIMO 矩阵送入盲源分离单元进行处理。

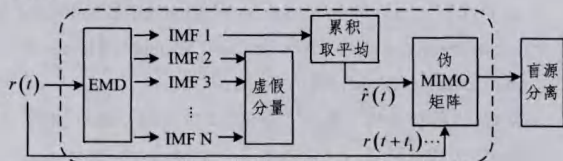


图3 EMD 处理单元的框图(虚线框以内)

实际场景中,通信装备操作员在遭遇干扰时也有改换频率表、增大功率等战术动作,因此所提方法作为一种新的跳频通信的增效措施,与真实的场景也是相符合的。所提方法能够改变传统抗干扰单纯“硬抗”或被动躲避的思路,从“容抗”的角度出发,针对传统增效措施难以有效对抗的全频带阻塞干扰,利用盲源分离将跳频通信信号与阻塞干扰分离开来,有望达到“扰中通”的通信效果,如图 4 所示。

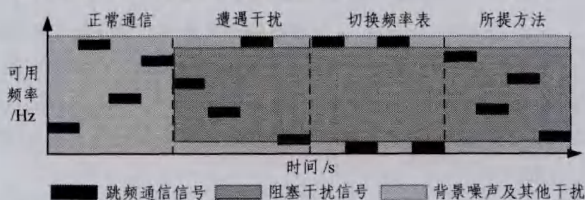


图4 增效方法示意图

在盲源分离单元中,除了利用常规的全盲盲源分离算法之外,还提出将半盲盲源分离算法 ICA-R 结合进来。其中,参考信号的选择可结合跳频通信收发双方共享调制方式、跳频图案等先验信息,设计为给定频率的正弦信号。以 BFSK 调制方式为例,设频率间隔为 Δf ,当前跳中心频率为 f_c ,则可以分别用频率为 $f_c + \Delta f$ 和 $f_c - \Delta f$ 的正弦信号 $ref1$ 、 $ref2$ 作为参考信号进行抽取,再将抽取出的结果分别与参考信号作相关,选择相关系数大的那一组对应的抽取结果送入解跳-解调单元。图 5 为盲源分离单元中采用半盲盲源分离方法时的工作流程图。

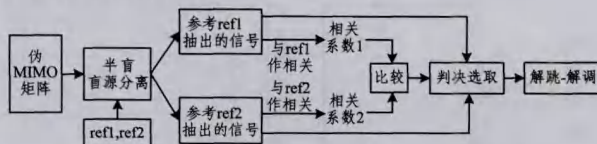


图5 半盲盲源分离算法工作流程

经解跳-解调得到数字基带信号,最后再译码得到信息序列 $I(n)$ 的估计 $\hat{I}(n)$ 。

3.2 仿真验证及性能分析

仿真中设定信息序列随机产生,信息速率为 1000bit/s,跳频信号采用 BFSK 调制方式,频率间隔 $\Delta f = 1\text{kHz}$,设定 5 个跳频点数,对应的数值为 $[40, 45, 50, 55, 60]\text{kHz}$,仿真时间为 0.15s,采样频率为 200kHz。跳频速率为 1000hop/s,即每跳对应一个信息比特。部分频带阻塞干扰由高斯白噪声经 10 阶巴特沃思滤波器并带通放大器产生,带宽设定为 35kHz~65kHz,实现对跳频信号的完全阻塞。

设定信干比为 -25dB,信噪比为 5dB,信号频谱图如图 6 所示。其中图 6(a)为跳频信号频谱图,图 6(b)为混合接收信号频谱图。

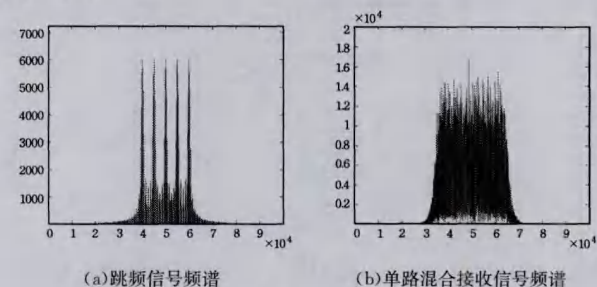


图6 信号频谱

由图 6 可以看出,由于干扰功率远远大于跳频信号功率,跳频信号被干扰信号完全压制,此时通信装备操作员将明显感受到通信性能严重下降,可以改用本节所提方法增效,以期提高系统的抗干扰能力。

改用本节所提方法后,首先由 EMD 单元开始虚拟观测信号的构建。如图 7 所示,图 7(a)为一跳时间内接收到的混合信号频谱图,图 7(b)~图 7(d)分别为对其分解得到的第一路至第三路 IMF 的频谱图。

如图 7(a)所示,第一路固有模式分量的频谱主瓣与混合接收信号几乎占有相同的频谱位置和带宽,而第二路、第三路固有模式分量产生了模式混叠,明显有频率偏移,可以判断为虚假分量,无法使用。依照 3.1 节中所述方法,得到一路虚拟观测信号 $\hat{r}(t)$ 。由于 $r(t)$ 为强干扰与跳频信号的混合,因此

$r(t)$ 也保留了很多干扰信号的信息,将 $\hat{r}(t)$ 与之后的逐跳实时信号组成伪 MIMO 矩阵,送入盲源分离单元。

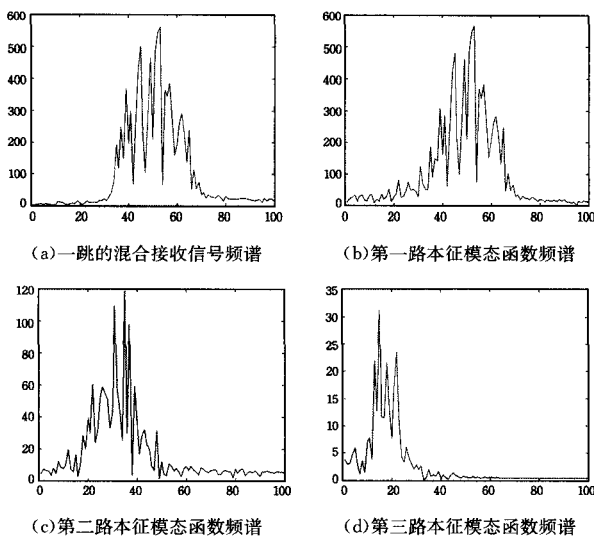


图 7 各路模态分量的频谱

盲源分离单元中分别采用全盲算法和半盲算法进行仿真比较。文献[3,14]表明,特征矩阵联合近似对角化(Joint Approximative Diagonalization of Eigenmatrix, JADE)算法是最合适噪声环境下通信信号盲分离的算法,因此本文采用 JADE 算法作为全盲盲源分离算法的代表,而半盲算法采用 ICA-R 算法,对跳频信号和部分频带阻塞干扰进行逐跳分离。

图 8 与图 9 为常规跳频扩谱通信与本文提出的方法抗部分频带噪声阻塞干扰的误码性能比较曲线,是 200 次蒙特卡洛仿真的平均结果。其中,虚拟观测信号在信干比为 -25dB 时构建, t_1 设定为 0.3s,即传送 300 跳(或传送了 300 个比特)。

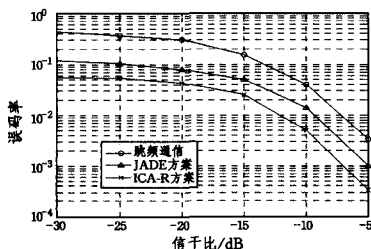


图 8 部分频带干扰下误码性能随信干比变化曲线(信噪比为 5dB)

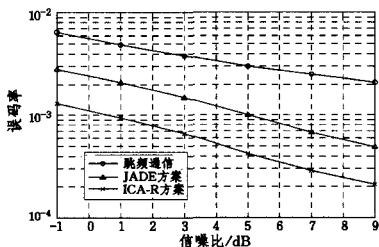


图 9 部分频带干扰下误码性能随信噪比变化曲线(信干比为 -5dB)

图 8 的仿真中,将信噪比固定为 5dB,考察所提算法在不同信干比下的性能。

由图 8 可以看出,分离信号的误码性能均好于未分离信号。信干比为 -5dB 时,采用跳频通信时的误码率为 0.0033,采用 JADE 方案时的误码率迅速下降为 0.0010,采用 ICA-R 方案时误码率还能减小到 0.0003。

在图 9 的仿真中,将信干比设定为 -5dB,信噪比范围设定为从 -1dB 以 2dB 步长步进到 9dB,考察所提算法误码率在 10^{-3} 附近的抗噪声鲁棒性。

由图 9 可以看出,3 种接收方法的误码率曲线随信噪比的增强都有下降的趋势,但是采用盲源分离抗干扰接收方案的误码性能明显好于未采用盲源分离接收方案的误码性能,其中 ICA-R 方案相比 JADE 方案,进一步提升了误码性能,体现了半盲盲源分离的优势。

值得注意的是,图 8 和图 9 的仿真中,虚拟信号构建时的信干比(-25dB)和 t_1 (0.3s)两个仿真条件仅作为说明本方法的示例,实际使用中还可以有其他设置方法,可以由通信装备操作员灵活操作。

下面以算法延时时为指标衡量算法的时间复杂度,将 200 次蒙特卡洛仿真的平均结果列于表 1。仿真平台为奔腾 I5 处理器,4GB 内存, MATLAB 2010。

表 1 算法延时

信干比/dB	-30	-25	-20	-15	-10	-5
时延/s	0.0007	0.0007	0.0007	0.0007	0.0007	0.0007

由表 1 可以看出,算法的时间开销不随信干比的减小而增大,均为毫秒级,且时延有望满足跳频通信实时性的要求。

结束语 本文针对典型的跳频通信场景,提出了一种结合经验模态分解和盲源分离的单通道盲分离抗干扰方法。首先通过理论和蒙特卡洛仿真确定了一种适合通信信号的伪 MIMO 映射方法,构造出虚拟观测信号;之后再分别利用盲源分离全盲算法和半盲算法实现扰信分离。仿真结果不仅验证了所提方法的有效性,还证明了半盲盲源分离算法相比全盲算法能够进一步提高误码性能。相关工作为单通道盲源分离抗干扰技术在跳频通信场景中的运用提供了有益参考。

参 考 文 献

- [1] Yao Fu-qiang. Communication Anti-jamming Engineering and Practice(Second edition)[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2012: 26(in Chinese)
姚富强. 通信抗干扰工程与实践(第 2 版)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012: 26
- [2] Wan Jian, Tu Shi-long, Liao Can-hui, et al. Theory and technology on blind source separation of communication signals[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012: 1-5(in Chinese)
万坚, 涂世龙, 廖灿辉, 等. 通信混合信号盲分离理论与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012: 1-5
- [3] Yu Miao, Wang Yue-hai, Wang Guo-fu. BSS based anti-jamming method of frequency hopping communication against partial-band noise jamming[J]. Systems Engineering and Electronics, 2013, 35(4): 1079-1084(in Chinese)
于淼, 王曰海, 汪国富. 基于 BSS 的跳频通信抗部分频带噪声阻塞干扰方法[J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(4): 1079-1084
- [4] Zhao Wen-hong, Wang Wei. Novel algorithm for single channel blind separation[J]. Computer Science, 2013, 40(6A): 61-63(in Chinese)
赵文红, 王巍. 求解单通道盲分离问题的一种新方法[J]. 计算机科学, 2013, 40(6A): 61-63

- [5] Tu Shi-long, Chen Yue-xin, Zheng Hui. Exploiting Error-control Codes in Single-channel Blind Separation of Co-frequency Modulated Signal[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2009, 31(9): 2113-2117 (in Chinese)
涂世龙, 陈越新, 郑辉. 利用纠错编码的同频调制混合信号单通道盲分离[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(9): 2113-2117
- [6] Qi Yang-yang, Yu Miao, Chen Jian-zhong. An Anti-Jamming Method for Frequency Hopping Communication Based on Single Channel BSS and Wavelet Packet[J]. Communications Technology, 2014, 47(12): 1360-1365 (in Chinese)
齐扬阳, 于淼, 陈建忠. 一种基于小波包的单通道盲源分离跳频通信抗干扰方法[J]. 通信技术, 2014, 47(12): 1360-1365
- [7] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1998, 454(1971): 903-995
- [8] Mijovic B, De Vos M, Gligorijevic I, et al. Source separation from single-channel recordings by combining empirical-mode decomposition and independent component analysis[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2010, 57(9): 2188-2196
- [9] Liu Jia, Yang Shi-e, Piao Sheng-chun. The single channel seismic-acoustic signal blind-source separation method based on EEMD[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2011, 32(2): 194-199 (in Chinese)
刘佳, 杨士莪, 朴胜春. 基于 EEMD 的地声信号单通道盲源分离算法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2011, 32(2): 194-199
- [10] Kamath V, Lai Y-C, Zhu L, et al. Empirical mode decomposition and blind source separation methods for antijamming with GPS signals[C] // IEEE Position Location and Navigation Symposium. 2006: 25-27
- [11] Lu W, Rajapakse J C. Approach and applications of constrained ICA[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2005, 16(1): 203-212
- [12] Lu W, Rajapakse J C. ICA with reference[J]. Neuron Computing, 2006, 69(16): 2244-2257
- [13] Wang Y-H, Yeh C-H, Young H-W V, et al. On the computational complexity of the empirical mode decomposition algorithm[J]. Physica A-Statistical Mechanics and its Applications, 2014, 400: 159-167
- [14] Fu Wei-hong, Yang Xiao-niu, Liu Nai-an. Robust Fourth-Order Cumulant-Based algorithm for communication signal blind separation[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2008, 30(8): 1853-1854 (in Chinese)
付卫红, 杨小牛, 刘乃安. 基于四阶累积量的稳健的通信信号盲分离算法[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(8): 1853-1856

(上接第 136 页)

速生长参数得到不同的流量速率增长函数, 以满足时延敏感流量的 QoS 需求。将 RBA 与 2 种典型的带宽分配策略进行了详尽的实验对比, 实验结果表明 RBA 可有效保障时延敏感流的低时延需求, 整体上提供了较高的平均带宽分配满足度, 效率较高; 同时可保证较高的带宽分配公平性。本文提出的带宽分配策略为设计性能更佳的数据中心骨干网络带宽分配系统提供了借鉴和理论支持。

参 考 文 献

- [1] Kandula S, Menache I, Schwartz R, et al. Calendaring for Wide Area Networks [C] // Proceedings of the 2014 ACM Conference on SIGCOMM. 2014: 515-526
- [2] Kandula S, Sengupta S, Greenberg A, et al. The nature of data center traffic: measurements and analysis [C] // Proceedings of the 9th ACM SIGCOMM Conference on Internet Measurement Conference. 2009: 202-208
- [3] Benson T, Anand A, Akella A, et al. Understanding data center traffic characteristics [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2010, 40(1): 92-99
- [4] Wang J M, Wang Ying, Dai Xiang-ming, et al. SDN-based Multi-Class QoS-guaranteed Inter-Data Center Traffic Management [C] // Proceeding of 2014 IEEE 3rd International Conference on Cloud Networking (CloudNet). 2014: 401-406
- [5] Jain S, Kumar A, Mandal S, et al. B4: Experience with a Globally-Deployed Software Defined WAN [C] // Proceedings of the 2013 ACM Conference on SIGCOMM. 2013: 3-14
- [6] Liu Zhong-jin, Li Yong, Su Li, et al. M2cloud: Software Defined Multi-site Data Center Network Control Framework for Multi-tenant [C] // Proceedings of the 2013 ACM Conference on SIGCOMM. 2013: 517-518
- [7] Popa L, Kumar G, Chowdhury M, et al. Faircloud: Sharing the network in cloud computing [C] // Proceedings of the 10th ACM Workshop on Hot Topics in Networks. 2012: 1-6
- [8] Guo Jian, Liu Fang-ming, Huang Xiao-meng, et al. On Efficient Bandwidth Allocation for Traffic Variability in Datacenters [C] // Proceedings of 2014 IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM 2014). 2014: 1572-1580
- [9] Richards F J. A flexible growth function for empirical use [J]. Exp. Bot., 1959, 10(2): 290-301
- [10] Lantz B, Heller B, McKeown N. A network in a laptop: rapid prototyping for software-defined networks [C] // Proceedings of the 9th ACM SIGCOMM Workshop on Hot Topics in Networks. 2010
- [11] Nlanr. PMA DATA [EB/OL]. 2011. <http://labs.ripe.net/data-repository/data-sets/nlanr-pma-data>
- [12] Jain R, Chiu D M, Hawe W. A Quantitative Measure of Fairness and Discrimination for Resource Allocation in Shared Computer System; DEC Research Report TR-301 [R]. 1984
- [13] Chiu D M, Jain R. Analysis of the increase and decrease algorithms for congestion avoidance in computer networks [J]. Computer Networks and ISDN Systems, 1989, 17(1): 1-14
- [14] Nace D, Pioro M. Max-min fairness and its applications to routing and load-balancing in communication networks; A tutorial [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2008, 10(4): 5-17