

doi:10.3969/j.issn.1001-2400.2013.03.021

## 覆盖多播网络中代理服务器的部署算法

徐 剑<sup>1,2</sup>, 倪 宏<sup>2</sup>, 邓浩江<sup>2</sup>, 刘 磊<sup>2</sup>

(1. 中国科学院大学, 北京 100049;

2. 中国科学院声学研究所 国家网络新媒体工程技术研究中心, 北京 100190)

**摘要:** 针对覆盖多播网络中现有代理服务器部署算法组播传输时延较高、代理服务器利用不均衡以及可扩展性差的问题, 提出了一种优化的度约束最小延迟代理服务器部署问题模型。该模型在网络中值问题的基础上, 为了优化组播端到端传输延迟, 改进了目标函数; 为了合理利用代理服务器, 引入度约束以反映代理服务器处理能力。证明了该模型属于 NP 完全问题, 提出了一种贪婪启发式算法。实验结果表明, 所提出模型能够减少组播平均端到端传输延迟, 并在不同网络规模和组规模下均有较好的性能表现。

**关键词:** 覆盖网络; 组播; 代理服务器部署; 启发式算法

**中图分类号:** TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2400(2013)03-0139-06

## Proxy placement algorithm for the overlay multicast network

XU Jian<sup>1,2</sup>, NI Hong<sup>2</sup>, DENG Haojiang<sup>2</sup>, LIU Lei<sup>2</sup>

(1. Univ. of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 2. National Network New Media Engineering Research Center, Institute of Acoustics Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** The existing proxy placement algorithms for the overlay multicast network usually lead to a number of problems, such as high multicast delay, unbalanced proxy load and lack of scalability. Focusing on these problems, an optimized degree constrained minimum delay proxy placement problem model is proposed based on the network median problem. In order to optimize multicast end-to-end delay, the model improves the object function. In order to utilize server resources rationally, the model abstracts the degree constraint to reflect the proxy processing capacity. In this model the problem is shown to be NP-Complete, and a greedy heuristic algorithm is proposed. Experimental results show that the model can decrease average end-to-end delay and have a good performance in different network sizes and multicast group sizes.

**Key Words:** overlay network; multicasting; proxy placement; heuristic algorithms

组播借助中间节点进行分发处理, 内容在每条网络链路上只需传递一次, 而且只有在链路分叉时内容才会被复制, 从而实现了高效的内容并发传输。以实时多媒体应用(如网络会议、IPTV、网上直播和网络教室等)为代表的新型网络应用, 对组播(Multicast)通信服务提出了迫切的要求。但是, 由于技术和经济方面的原因<sup>[1]</sup>, 直到现在, 全网范围内的 IP 组播服务尚未完部署。

覆盖多播网络(Overlay Multicast Network, OMN)<sup>[2-11]</sup>通过部署代理服务器, 在应用层提供组播服务。代理服务器负责构造核心组播分发网络, 用户必须先连接到代理服务器上, 方可进行数据的收发。实际数据传输通过底层点到点的单播来完成。OMN 具有以下优点: (1)无须改变现有的 IP 网络, 可灵活部署; (2)代理服务器长期稳定地存在网络中, 可以根据应用流量特征和底层网络拓扑, 策略性选择代理服务器位置, 实现网络优化配置, 以达到高资源利用率、低延迟和高可靠性的网络性能; (3)代理服务器之间的线路可以采用

收稿日期: 2012-06-18

网络出版时间: 2013-02-25

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)资助项目(2011AA01A102); 国家科技支撑计划资助项目(2011BAH11B04); 中国科学院战略性先导科技专项子课题资助项目(XDA06010302)

作者简介: 徐 剑(1985-), 男, 中国科学院博士研究生, E-mail: xuj@dsp.ac.cn.

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1076.TN.20130225.1050.201303.170.021.html>

租用线路或者虚拟专用线路,以避免与因特网上的 IP 数据流竞争网络带宽资源,从而避免由于竞争引起的抖动、高延迟、低吞吐率等不可预测的网络破坏性行为.因此,OMN 能实现实时多媒体数据的高效分发,同时保证服务质量(Quality of Service,QoS).

目前关于 OMN 的研究主要集中于组播树的建立和优化,以降低端到端延迟、提高服务节点的带宽利用率<sup>[2-6]</sup>,这些研究均假设代理服务器已预先完成部署.代理服务器的部署问题并没有得到广泛研究.分析可知,OMN 中端到端传输延迟由源到代理服务器、代理服务器之间、代理服务器到用户三部分传输延迟组成,因此研究代理服务器的部署位置对降低 OMN 中端到端传输延迟有着重要的意义.

影响代理服务器部署位置的因素有物理网络拓扑结构、代理服务器的处理能力、链路延迟、组播组数目、组播组规模、路由算法、组播组成员分布情况等.文献[7-9]在研究代理服务器部署问题时同时考虑组播组路由,即根据具体的组播组、路由算法优化部署问题,增加了问题复杂度,且可扩展性较差.

文献[10]将代理服务器部署问题、路由问题划分为不同子问题逐步优化,简化了问题复杂度,并将代理服务器部署问题(Overlay Proxy Placement,OPP)规划为网络  $p$  中值问题,为代理服务器部署问题提供了很好的研究思路.但仔细分析发现有两个问题:(1)该问题模型优化目标是所有用户到最近的代理服务器总传输延迟最小,没有考虑代理服务器之间的转发延迟,容易造成代理服务器在网络边缘聚集,从而并不能从总体上减少端到端延迟;(2)该问题模型未考虑代理服务器的处理能力约束,将会造成某些位置的代理服务器需要支持较多的用户,负载较重,普通服务器的性能、上行带宽不能满足需求,需要部署超级服务器,增加部署成本;而另外一些位置的代理服务器支持用户较少,处理能力没有得到充分应用,浪费系统资源.

针对以上问题,本文将代理服务器部署、组播路由划分为不同子问题分别优化,同时考虑源到代理服务器、代理服务器之间、代理服务器到用户的传输延迟和代理服务器处理能力,抽象出一个新的更全面的度约束最小延迟代理服务器部署问题模型(Degree Constrained Minimum Delay overlay proxy placement,DCMD).

## 1 问题模型

为了提高部署方案的扩展性,本文从平均意义上度量端到端传输延迟,而不依赖具体的组播路由算法.源和用户概念是相对的,源到代理服务器(记为源代理)、代理服务器(记为目的代理)到用户的传输延迟,可以用所有用户到代理服务器的平均传输延迟来度量;源代理和目的代理之间的端到端传输延迟,可以用代理服务器之间的平均传输延迟来度量.OMN 中代理服务器的主要功能是根据路由表复制转发数据,度约束是代理服务器能同时复制和转发分组的最大数目,反映了服务器处理器性能和上行带宽.另外,受限于部署成本和维护控制开销,代理服务器的数目也有限制.

将 OMN 映射为图论中的图,则 DCMD 问题定义如下:给定一个路由器集合  $V$ ,网络规模  $n=|V|$ ,路由器  $r_i$  连接的用户数  $w_i$ ,用户总数  $n_c = \sum_{i=1}^n w_i$ , $d_{ij}$  是任意两个路由器  $r_i, r_j$  ( $1 \leq i, j \leq n$ ) 之间的传输延迟,代理服务器服务的度约束值为  $D$ .求解一个子集  $V_p \subseteq V$ ,  $|V_p|=p$ ,在  $\forall r \in V_p$  处部署代理服务器为用户提供数据转发服务,使所有用户的平均传输延迟最小.

在给出数学描述之前,需要引入变量:

$$X_j = \begin{cases} 1 & \text{如果 } r_j \text{ 被选中就近部署代理服务器,} \\ 0 & \text{否则,} \end{cases} \quad \forall j \in [1, n], \text{就近部署于 } r_j \text{ 处的代理服务器记为 } p_j;$$

$$Y_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{如果 } r_i \text{ 连接的用户由 } p_j \text{ 提供数据转发服务,} \\ 0 & \text{否则,} \end{cases} \quad \forall i, j \in [1, n], r_i \text{ 连接的用户由 } p_j \text{ 提供数据}$$

转发服务,称为代理服务器  $p_j$  服务路由器  $r_i$ .

有了上面定义,可以得到 DCMD 问题的整数线性规划问题模型:

$$\min z = 2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_i d_{ij} Y_{ij} / n_c + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n X_i X_j d_{ij} / (p(p-1)) \quad (1)$$

$$\text{s. t.} \quad \sum_{j=1}^n Y_{ij} = 1, \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^n X_j = p, \quad (3)$$

$$Y_{ij} - X_j \leq 0, \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^n w_i Y_{ij} \leq D. \quad (5)$$

目标函数式(1)中,第1部分表示用户到代理服务器、源到代理服务器的加权平均传输延迟 $z_1$ ,第2部分表示代理服务器之间的平均转发延迟 $z_2$ .约束式(2)表示每个路由器连接的用户只能由一个代理服务器提供数据收发服务.约束式(3)表示代理服务器数目为 $p$ .约束(4)将选址变量 $X_j$ 和分配变量 $Y_{ij}$ 联系起来,表示代理服务器 $p_j$ 确定部署之后才能为其他路由器提供服务.约束式(5)表示每个代理服务器服务用户数目不能超过其处理能力.

文献[12]指出网络 $p$ 中值问题是NP完全问题,它是求解DCMD问题的特殊情况,即代理服务器度无穷大、代理服务器之间转发延迟为0时的情况,所以DCMD问题也是NP完全问题.

## 2 启发式算法

求解NP完全问题通常有两种算法:确切算法和近似算法.确切算法需进行枚举,时间复杂度呈指数特性,在实际部署时网络规模较大,路由器数目较多,确切算法不适合于求解DCMD问题.启发式算法为了获得多项式时间的求解速度,从一定程度上降低求解的准确度,计算比较快且得到的结果也不是很差,所以较为实用.本节给出了求解DCMD问题的贪婪启发式算法.需要指出的是,求解NP完全问题启发式算法很多,如禁忌搜索算法、拉格朗日松弛算法、蚁群算法、模拟退火算法、遗传算法等.本文主要贡献是给出了更全面的代理服务器部署问题模型,对于启发式算法的性能比较可以在以后的工作中完成.

### 2.1 算法描述

DCMD问题包括选址问题和分配问题两部分.在这两部分均采用贪婪思想,在每一步选择中都采取在当前状态下最优的选择.选址问题即确定代理服务器部署位置,受限于度约束,为了便于寻找可行解,采用排除法,每次迭代删除一个使平均传输延迟增加最小的备选位置,直至集合 $|V_p|=p$ .当代理服务器部署位置确定之后,需要为路由器分配代理服务器;路由器应由离其最近的代理服务器提供服务,但是代理服务器的度不一定能满足需求,因此需要有所取舍.基于度约束的分配问题实质上是装箱问题的变种,也是NP难问题,分配顺序将极大影响平均传输延迟.本算法优先为连接用户数较多的路由器分配.

贪婪算法的具体步骤如下:

(1) 初始化.部署位置集合 $V_p=V, k=n, \forall r_i \in V_p$ 处部署代理服务器 $p_i$ ,其目前服务的路由器集合 $V_i=\{r_i\}$ ,计算平均传输延迟 $z$ ,此时用户到代理服务器加权传输延迟 $z_1=0$ ,代理服务器之间平均转发延迟

$$z_2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij} / (n(n-1)).$$

(2) 遍历.对 $\forall r_i \in V_p$ ,假定 $r_i$ 处不再部署 $p_i$ ,需要为 $V_i$ 中路由器重新分配代理服务器.

① 排列,即将 $V_i$ 中路由器按照 $w$ 从大到小排序, $w$ 相同,则按照 $\min\{d_{ij}, i \in V_i, j \in V_p\}$ 从大到小排列;

② 遍历,即对 $\forall r_k \in V_i$ 查找离其最近的未超过度约束的代理服务器 $p_{j_k} (r_{j_k} \in V_p - r_i)$ ,令 $V'_{j_k}(r_i) = V_{j_k} \cup r_k$ ;

③ 遍历完成,更新 $z'_1 = z_1 + 2 \left( \sum_{k \in V_i} w_k (d_{k i_k} - d_{k i}) \right) / n_c$ ,减去与 $r_i$ 相连的边更新 $z'_2 = z_2 (k / (k-2)) - 2 \sum_{i \in V_p} d_{ii} / ((k-1)(k-2))$ ,得到 $z' = z'_1 + z'_2$ .

(3) 从集合  $V_p$  中删除  $z'$  最小的部署位置  $r_{\min}$ , 令  $V_p = V_p - r_{\min}$ ,  $k = k - 1$ ,  $V_i = V_i(r_{\min})$ ,  $z = \min z'$ .

(4) 如果  $k = p$ , 迭代结束; 否则, 重复步骤(2)、(3).

## 2.2 算法复杂度分析

贪婪算法每次迭代会尝试删除一个备选位置  $r_i$ , 重新计算平均传输延迟  $z$ , 并为  $\forall r_k \in V_i$  重新分配为其提供服务的代理服务器  $p_{i_k}$ , 称为再分配过程. 第 1 次迭代时, 尝试删除所有  $n$  个备选位置, 需要进行  $n$  次再分配过程, 再分配过程的时间复杂度为  $n-1$ , 第 1 次迭代的时间复杂度为  $n(n-1)$ . 相应第  $k$  次迭代时, 需要进行  $n-k+1$  次再分配过程, 再分配过程的时间复杂度为  $|V_i|(n-k)$ , 其中  $|V_i| \leq Dn/n_c \ll n$ , 可记为常数, 则第  $k$  次迭代时间复杂度为  $O((n-k)(n-k+1))$ . 贪婪算法的总的时间复杂度为  $O(\sum_{k=1}^{n-p} (n-k)(n-k+1)) = O(n^3)$ .

## 3 实验仿真分析

在本节中, 通过仿真实验验证代理服务器部署模型的有效性. 通过在相同的网络拓扑下, 分别采用网络  $p$  中值(记为 NPM)、DCMD 两种部署方案, 选择代理服务器部署位置. 在这些代理服务器组成的覆盖网上, 通过对比相同组播组的平均端到端传输延迟, 来比较方案的性能表现. 为了保证方案比较的同等性, NPM 方案也考虑代理服务器的度约束.

组播组平均端到端传输延迟  $T_{\text{avg}}$  是数据从数据源到加入组播组的所有用户端到端传输延迟的平均值,

$T_{\text{avg}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \text{delay}(P(s, i))$ , 其中  $n$  是加入组播组的用户数,  $P(s, i)$  是从数据源  $s$  到用户  $i$  的传输路径.

仿真实验采用 NS-2 平台, 通过 GT-ITM 提供的 Transit-Sub(TS)模型<sup>[7-10]</sup>生成层次化网络拓扑作为实验的底层网络. 邻接路由器的直线距离作为链路延迟, 并采用最短路径算法计算每对路由器之间的传输延迟. 由于骨干网路由器不直接连接用户, 所有用户随机连接到 Stub 域路由器, 并随机加入组播组. 采用最短路径树算法为每个组播组构建代理服务器之间的分发树. 实验中, 对每种场景测试 100 个组播组, 以平均值作为实验值. 仿真涉及的参数及取值如表 1 所示.

表 1 仿真参数表

参数	描述	取值	参数	描述	取值
$n_T$	Transit 域路由器数目	50	$n_S$	Stub 域路由器数目	500~1 000
$\text{model}_T$	Transit 域平面随机图模型	Waxman	$\text{model}_S$	Stub 域平面随机图模型	Waxman
$\alpha_T$	Transit 域两点邻接概率	0.8	$\alpha_S$	Stub 域两点邻接概率	0.3
$\beta_T$	Transit 域长短边比值	0.5	$\beta_S$	Stub 域长短边比值	0.5
$\text{scale}_T$	Transit 域两点最大距离 $2^{1/2} \cdot \text{scale}_T$	100 ms	$\text{scale}_S$	Stub 域两点最大距离 $2^{1/2} \cdot \text{scale}_S$	20 ms
$n_c$	总用户数	100 000	$D$	代理服务器度约束	4 000
$n_g$	组播组规模	100~2 000	$n_p$	代理服务器数目	30~40

模拟实验分别比较了两种方案在不同网络规模、不同组规模、不同代理服务器数目情况下的性能表现. 实验结果表明, 对于相同网络条件、相同组播组、相同路由算法, DCMD 方案的平均端到端延迟比 NPM 方案的更低. 这是因为, NPM 方案造成代理服务器部署位置太靠近用户, 虽然降低了从用户到代理服务器的延迟、源到代理服务器的延迟, 但是增加了代理服务器间的转发延迟; 而 DCMD 方案的目标函数考虑到端到端传输延迟的各个组成部分, 在选择位置时, 综合各部分的延迟, 改善效果显著.

从图 1 可以看出, 随着网络规模的增加, 源到代理服务器、

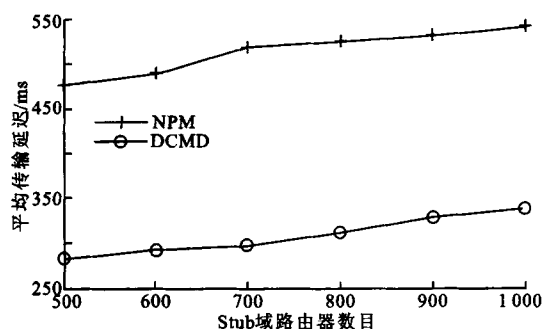


图 1 网络规模对平均传输延迟的影响

代理服务器之间、代理服务器到用户的网络跳数增加,DCMD 和 NPM 方案的平均传输延迟均随之增加.从图 2 可以看出,组规模的增长对平均传输延迟影响不大,DCMD 和 NPM 方案的扩展性较好.这是因为在 OMN 组播中,用户首先连接到代理服务器,代理服务器再加入组播树,组平均传输延迟主要受组中代理服务器数目的影响<sup>[11]</sup>,由于用户分布的随机性,处于边缘的代理服务器均会加入组播组.从图 3 可以看出,随着部署代理服务器数目的增加,DCMD 方案平均传输延迟并无明显改善.这是因为 DCMD 方案选择部署位置时,以最小化端到端传输延迟为目标,在负载未增加时,新增的代理服务器只是增加了路由备选路径,并未降低代理服务器之间的最短转发延迟.在实际部署中,应避免出现部署成本急剧增加但服务质量未改善的情况.另外,随着代理服务器数目的增加,传输覆盖网的维护和控制开销也将急剧增加.所以在实际部署中,应根据负载合理选择代理服务器的数目.

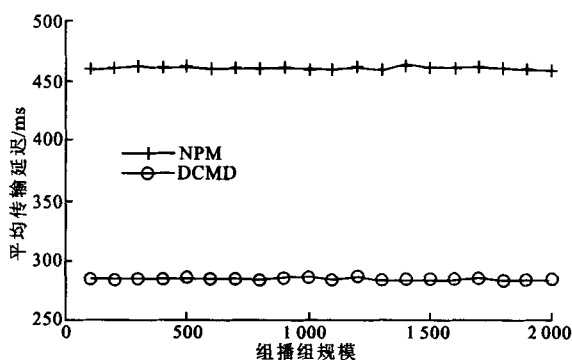


图2 组规模对平均传输延迟的影响

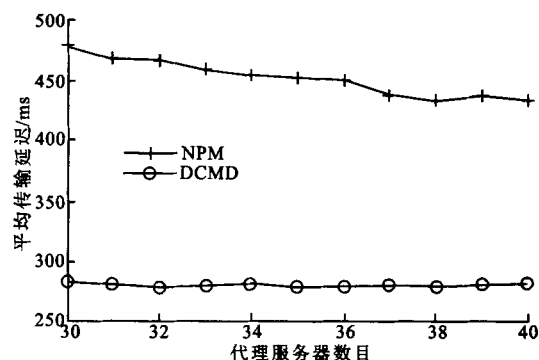


图3 代理服务器数目对平均传输延迟的影响

## 4 总 结

本文主要研究了覆盖多播网络中代理服务器部署位置的优化选取问题.在代理服务器部署位置选取过程中充分考虑了源到代理服务器、代理服务器之间、代理服务器到用户的传输延迟和代理服务器处理的能力限制,定义了一种更加全面的问题模型——DCMD,证明这个问题属于 NP 完全问题.给出了贪婪启发式算法进行求解,并分析其时间复杂度.仿真实验验证了 DCMD 模型的有效性,同时说明了 DCMD 模型在不同网络规模和组播组规模下均有较好的性能表现.在今后的研究中,我们将对比现代启发式算法在求解 DCMD 问题时的性能表现,同时我们将致力于在 OMN 上构建和维护适用于大规模实时直播流分发的组播树.

### 参考文献:

- [1] Diot C, Levine B N, Lyles B, et al. Deployment Issues for the IP Multicast Service and Architecture [J]. IEEE Network, 2000, 14(1): 78-88.
- [2] Shi Y S, Turner J S. Multicast Routing and Bandwidth Dimensioning in Overlay Networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2002, 20(8): 1444-1455.
- [3] Banerjee S, Kommareddy C, Kar K, et al. Construction of an Efficient Overlay Multicast Infrastructure for Real-time Applications [C]//IEEE International Conference on Computer Communications. San Francisco: IEEE, 2003: 1521-1531.
- [4] Li Z, Mohapatra P. The Impact of Topology on Overlay Routing Service [C]//IEEE International Conference on Computer Communications. Hong Kong: IEEE, 2004: 408-418.
- [5] 吴家皋, 叶晓国, 姜爱全. 一种异构环境下覆盖多播网络路由算法[J]. 软件学报, 2005, 16(6): 1112-1119.  
Wu Jiagao, Ye Xiaoguo, Jiang Aiquan. A Routing Algorithm in Heterogeneous Overlay Multicast Networks [J]. Journal of Software, 2005, 16(6): 1112-1119.
- [6] 张晓瑜, 张光昭. 在 overlay 网络上的负载均衡多播路由算法[J]. 通信学报, 2009, 30(4): 86-92.  
Zhang Xiaoyu, Zhang Guangzhao. Load Balance Multicast Routing Algorithms on Overlay Network [J]. Journal on Communications, 2009, 30(4): 86-92.

- [7] Guo J, Jha S. Placing Multicast Proxies for Internet Live Media Streaming [C]//IEEE Conference on Local Computer Networks. Dublin: IEEE, 2007: 149-156.
- [8] Wu M Y, Zhu Y, Shu W. Placement of Proxy-based Multicast Overlays [J]. Computer Networks, 2005, 48(4): 627-655.
- [9] Yang S Y, Kim Y A, Wang B. Designing Infrastructure-Based Overlay Networks for Delay-sensitive Group Communications [C]//Global Telecommunications Conference. Washington: IEEE, 2007: 565-570.
- [10] Lao Li, Cui Junhun, Gerla M, et al. A Scalable Overlay Multicast Architecture for Large-Scale Applications [J]. IEEE Trans on Parallel and Distributed Systems, 2007, 18(4): 449-459.
- [11] Khare V, Zhang B. Towards Economically Viable Infrastructure-based Overlay Multicast Network [C]//IEEE International Conference on Computer Communications. Rio de Janeiro: IEEE, 2009: 1989-1997.
- [12] 杨丰梅, 华国伟, 邓猛, 等. 选址问题研究的若干进展 [J]. 运筹与管理, 2005, 14(6): 1-7.  
Yang Fengmei, Hua Guowei, Deng Meng, et al. Some Advances of the Researches on Location Problems [J]. Operations Research and Management Science, 2005, 14(6): 1-7.

(编辑: 夏大平)

(上接第 86 页)

- [6] Hung C J, Chen C H. New Algorithm for Fast Direction-of-arrival Estimation Using the Shrinking Signal Subspace and the Noise Pseudo-eigenvector [J]. IET Radar Sonar Navig, 2010, 4(4): 604-610.
- [7] Zhang Y, Ye Z, Xu X, et al. Estimation of Two-dimensional Direction-of-arrival for Uncorrelated and Coherent Signals with Low Complexity [J]. IET Radar Sonar Navig, 2010, 4(4): 507-519.
- [8] Zhang Xiaofei, Xu Lingyun, Xu Lei, et al. Direction of Departure(DOD) and Direction of Arrival(DOA) Estimation in MIMO Radar with Reduced-Dimension MUSIC [J]. IEEE Communications Letters, 2010, 14(12): 1161-1163.
- [9] 许建忠, 孙红伟, 孙业岐, 等. 采用 Radon-Wigner 变换的二维波达方向估计 [J]. 电子与信息学报, 2012, 34(4): 997-1001.  
Xu Jianzhong, Sun Hongwei, Sun Yeqi, et al. 2-D Direction of Arrival Estimation Method Using Radon-Wigner Transform [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2012, 34(4): 997-1001.
- [10] 刘国红, 孙晓颖, 王波. 非均匀噪声下频率及二维到达角的联合估计 [J]. 电子学报, 2011, 39(10): 2427-2430.  
Liu Guohong, Sun Xiaoying, Wang Bo. Joint Estimation for Frequency and 2-D DOA in Nonuniform Noise [J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(10): 2427-2430.
- [11] 闫锋刚, 刘帅, 金铭, 等. 基于降维噪声子空间的二维阵列 DOA 估计算法 [J]. 电子与信息学报, 2012, 34(4): 832-837.  
Yan Fenggang, Liu Shuai, Jin Ming, et al. 2-D DOA Estimation Method Based on Dimension Descended Noise Subspace [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2012, 34(4): 832-837.
- [12] 刘楠, 张娟, 张林让, 等. 一种适用于 MIMO 雷达的低复杂度二维 DOA 估计方法 [J]. 电子学报, 2012, 40(3): 505-511.  
Liu Nan, Zhang Juan, Zhang Linrang, et al. A Low Complexity 2-D DOA Estimation Method for MIMO Radar [J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(3): 505-511.
- [13] 吴建新, 王彤, 索智勇. 一种快速波达方向估计算法 [J]. 西安电子科技大学学报, 2009, 36(2): 263-268.  
Wu Jianxin, Wang Tong, Suo Zhiyong. Fast DOA Estimation Algorithm Based on the Multistage Wiener Filter [J]. Journal of Xidian University, 2009, 36(2): 263-268.

(编辑: 齐淑娟)