

基于 Chan 的 TDOA 三维定位算法

李招华¹, 汪毓铎¹, 邵 青²

(1. 北京信息科技大学, 北京, 100101; 2. 工业和信息化部电信研究院泰尔终端实验室, 北京, 100191)

摘要: 针对移动终端精确定位的需求, 分析了基于 TDOA 无线定位技术, 将二维的定位推广到三维空间, 推导了三维空间的 Chan 算法。同时, 针对 TDOA 定位技术的准确性与精确的测距密切相关, 采用 Kalman 滤波技术进行优化, 获得了准确的终端与各基站的距离差, 提升了定位的准确性。仿真结果显示, 优化后的三维 Chan 定位算法, 能够获得更加精确的三维定位信息。

关键词: TDOA, Chan 算法, Kalman 滤波

Abstract: According to the needs of pinpointing of mobile terminal, this paper analyses wireless location technology based on TDOA. Extending the existing two-dimensional location algorithms to three-dimensional space, we derive the Chan algorithm of 3 dimension space. The location technology's accuracy based on TDOA depends heavily on ranging. Optimizing it with Kalman filtering technology, we could obtain an accurate range distance between the terminal and the base station, and improve the location accuracy. The simulation results show that the 3D-Chan location algorithm could achieves more accurate 3D locating information.

Keywords: TDOA, Chan algorithm, Kalman filtering

1 引言

近年来, 随着 3G、4G 移动通讯技术的发展和用户需求的增加, 移动定位技术受到越来越多的关注, 推动了移动定位技术的发展。移动定位的实现方法主要通过对移动终端与接收机进行测距, 进而计算得到移动终端的位置信息。根据测距观测量的不同, 常用定位技术可分为信号接收强度(RSSI: Received signal strength indication)、到达时间(TOA: Time of arrival)、到达时间差(TDOA: Time difference of arrival)、到达角度(AOA: Angle of arrival)等定位算法^[1,2,3]。基于信号传输时间的定位技术是目前研究最广泛的定位技术之一, 其中 TDOA 算法计算因其复杂性低、易于实现等诸多优点而受更多的重视^[3,4]。

TDOA 定位技术的核心是测量信号从移动终端(MS)到达 2 个接收基站(BS)之间的时间差, 根据时间差计算距离, 求解定位方程组, 确定 MS 的位置。定位方程组具有非线性特点, 通常需将其转换为线性方程组进行求解。Smith 等^[5]提出了基于最小二乘法(LS)

的求解算法,但给出的是次最优解。泰勒技术展开算法是求解非线性方程的有效方法,但要求迭代计算的初始值必需准确才能保证比较快的收敛速度,且是否收敛与 MS 的位置有关。Chan 算法^[6]采用二重最小二乘法(WLS)对定位方程组进行求解,给出了非迭代闭式解,在 TDOA 测量误差比较小时,具有最优的估计性能,但随着测量误差增大,算法的性能迅速下降。测量误差主要包括两个方面:一是测距误差,是由于无线传输过程中,发射机和接收机之间的频率偏差、多径效应等多种因素造成的;二是由定位方程组的非线性引起的,且会放大定位误差。

由于用户对精确定位的需求,特别是在高楼林立的现代都市,如一些商家需要分析客流量和客流流向,这种需求更加迫切,人们不仅关心二维的位置信息,更希望能得到精确的三维位置信息。因此,本文提出了三维的 TDOA 定位方案,详细分析和讨论 Chan 算法,并采用 Kalman 滤波算法对测量数据进行了处理,通过仿真分析,验证算法的有效行,提高了的三维定位的精确度。

2 TDOA 定位原理与 Chan 算法

基于 TDOA 的定位系统中,一旦获得 TDOA 的测量值,就可以得到移动终端到定位基站之间的距离差,多个测量值构成一组关于移动终端位置的双曲线方程组,求解该方程组就可以得到目标的估计位置。由于定位方程组是非线性的,而且 TDOA 的测量总存在误差,所以定位问题就由求解非线性方程转换为非线性的最优化问题。下面分析三维空间下,基于 Chan 的 TDOA 定位算法。

假设三维(3D)空间上任意的分布着 N 个基站,MS 的估计位置为 (x, y, z) ,基站 BS_i 的位置为 (x_i, y_i, z_i) ,移动终端(MS)到达第 i 个 BS_i 的距离为 R_i ,可以得到

$$R_i = \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2} \quad (1)$$

假定以基站 BS_1 为参考点,移动终端分别到基站 BS_1 、基站 BS_i 的距离差 $R_{i,1}(i=1 \cdots N)$,可以通过测量两个基站发出信号到达移动终端的时间差 $\Delta t_{i,1}$ (TDOA 测量值)来确定, $R_{i,1} = c\Delta t_{i,1}$,其中 c 是电磁波传播速度。那么有

$$R_i^2 - R_1^2 = (x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2 - (x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2 \quad (2)$$

对上式化简,令 $X_{i,1} = x-x_i, Y_{i,1} = y-y_i, Z_{i,1} = z-z_i$ 可得到:

$$R_i^2 - R_1^2 = 2[X_{i,1} \ Y_{i,1} \ Z_{i,1}] \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + K_i - K_1 \quad (3)$$

其中 $K_i = x_i^2 + y_i^2 + z_i^2$ 。

当基站数目 $N=4$ 时,可得到 3 个 TDOA 测量值,假设 R_1 为已知,则 MS 的位置为

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} X_{2,1} & Y_{2,1} & Z_{2,1} \\ X_{3,1} & Y_{3,1} & Z_{3,1} \\ X_{4,1} & Y_{4,1} & Z_{4,1} \end{bmatrix} * \left\{ \begin{bmatrix} R_{2,1} \\ R_{3,1} \\ R_{4,1} \end{bmatrix} R_1 + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} R_{3,1}^2 - K_2 - K_1 \\ R_{3,1}^2 - K_3 - K_1 \\ R_{3,1}^2 - K_3 - K_1 \end{bmatrix} \right\} \quad (4)$$

当基站数目 $N \geq 5$ 时,TDOA 测量值的数目大于未知参数的数目,可以采用加权最小二乘法(WLS)来充分利用冗余的数据,Chan 算法能获得更加好的移动终端位置估计值。此时先将初始非线性 TDOA 方程组转换为线性方程组,然后采用 WLS 得到初始解,再利用第一次得到的估计坐标及附加变量等已知约束条件进行第二次 WLS 估计,从而得到改进的估计坐标。令 $\mathbf{z}_a = [\mathbf{z}_p^T, R_1]^T$ 为未知矢量,其中 $\mathbf{z}_p = [x, y, z]^T$,则可建立存在 TDOA 噪声的线性方程:

$$\boldsymbol{\psi} = \mathbf{h} - \mathbf{G}_a \mathbf{z}_a \quad (5)$$

$$\text{其中 } \mathbf{h} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} R_{3,1}^2 - K_2 - K_1 \\ R_{3,1}^2 - K_3 - K_1 \\ \vdots \\ R_{N,1}^2 - K_N - K_1 \end{bmatrix}, \mathbf{G}_a = \begin{bmatrix} -x_{2,1} & -y_{2,1} & -z_{2,1} & -R_{2,1} \\ -x_{3,1} & -y_{3,1} & -z_{3,1} & -R_{3,1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -x_{N,1} & -y_{N,1} & -z_{N,1} & -R_{N,1} \end{bmatrix}$$

\mathbf{z}_a^0 为移动用户的实际位置所对应的 \mathbf{z}_a 的值。

求解非线性方程时,假定 \mathbf{z}_a 的各元素间相互独立, \mathbf{z}_a 的加权最小二乘估计的结果为:

$$\mathbf{z}_a = \arg \min \left\{ (\mathbf{h} - \mathbf{G}_a \mathbf{z}_a)^T \Psi^{-1} (\mathbf{h} - \mathbf{G}_a \mathbf{z}_a) \right\} \quad (6)$$

$$= (\mathbf{G}_a^T \Psi^{-1} \mathbf{G}_a) \mathbf{G}_a^T \Psi^{-1} \mathbf{h}$$

其中, Ψ 为误差矢量 Ψ 的协方差矩阵 $\Psi = E[\Psi \Psi^T] = c^2 \mathbf{B} \mathbf{Q} \mathbf{B}^T$ [6], \mathbf{Q} 为 TDOA 测量值的协方差矩阵 $\mathbf{Q} = \text{diag} \{ \sigma_{2,1}^0, \sigma_{3,1}^0, \dots, \sigma_{N,1}^0 \}$, $\mathbf{B} = \text{diag} \{ R_2^0, R_3^0, \dots, R_N^0 \}$, R_i^0 可根据 $\mathbf{z}_a \approx (\mathbf{G}_a^T \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{G}_a)^{-1} \mathbf{G}_a^T \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{h}$ 求得。

通过式(6)可以得到移动台位置估计的初步结果,但以上计算是在假定 \mathbf{z}_a 的各元素是独立的情况下进行的,而实际上 \mathbf{z}_a 中 R 是与 (x, y, z) 有关的量,用 \mathbf{Q} 矩阵近似代替误差矢量的协方差矩阵 Ψ 会带来一定的误差。为了得到更精确的定位结果,可以接着进行第二步估计。首先计算估计位置 \mathbf{z}_a 的协方差矩阵,在有噪声的情况下

$$R_{i,1} = R_{i,1}^0 + cn_{i,1}, \mathbf{G}_a = \mathbf{G}_a^0 + \Delta \mathbf{G}, \mathbf{h} = \mathbf{h}^0 + \Delta \mathbf{h} \quad (7)$$

由于 $\mathbf{h}^0 = \mathbf{G}_a^0 \mathbf{z}_a^0$, 式(5)表明

$$\Psi = \Delta \mathbf{h} - \Delta \mathbf{G}_a \mathbf{z}_a^0 \quad (8)$$

令 $\mathbf{z}_a = \mathbf{z}_a^0 + \Delta \mathbf{z}_a$, 则 $\Delta \mathbf{z}_a$ 和其协方差矩阵为

$$\Delta \mathbf{z}_a = (\mathbf{G}_a^T \Psi^{-1} \mathbf{G}_a) \mathbf{G}_a^T \Psi^{-1} \mathbf{B} \mathbf{n}$$

$$\text{cov}(\mathbf{z}_a) = E[\Delta \mathbf{z}_a \Delta \mathbf{z}_a^T] = (\mathbf{G}_a^0 \Psi^{-1} \mathbf{G}_a)^{-1}$$

矢量 \mathbf{z}_a 为均值为实际值,协方差由(6)确定的随机变量,因此 \mathbf{z}_a 的元素可表示为

$$z_{a,1} = x^0 + e_1, z_{a,2} = y^0 + e_2, z_{a,3} = z^0 + e_3, z_{a,4} = R^0 + e_4$$

其中: e_1, e_2, e_3, e_4 为 \mathbf{z}_a 的估计误差。

可建立线性方程组:

$$\Psi' = \mathbf{h}' - \mathbf{G}_a' \mathbf{z}_a' \quad (9)$$

$$\text{其中 } \Psi' \text{ 为 } \mathbf{z}_a' \text{ 的误差矢量, } \mathbf{h}' = \begin{bmatrix} (z_{a,1} - x_1)^2 \\ (z_{a,2} - y_1)^2 \\ (z_{a,3} - z_1)^2 \\ z_{a,4}^2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{G}_a' = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{z}_a' = \begin{bmatrix} (x - x_1)^2 \\ (y - y_1)^2 \\ (z - z_1)^2 \end{bmatrix}。$$

与前面的分析和推倒类似,可以得到含有移动终端位置的未知量 \mathbf{z}_a' 的解为:

$$\mathbf{z}_a' = (\mathbf{G}_a'^T \Psi'^{-1} \mathbf{G}_a') \mathbf{G}_a'^T \Psi'^{-1} \mathbf{h}' \quad (10)$$

其中, Ψ'^{-1} 为估计误差的协方差矩阵,

$$\Psi' = \mathbf{h}' - \mathbf{G}_a' \mathbf{z}_a'^0, \Psi' = E[\Psi' \Psi'^{-1}] = 4 \mathbf{B}' \text{cov}(\mathbf{z}_a) \mathbf{B}',$$

$$\mathbf{B}' = \text{diag} \{ x^0 - x_1, y^0 - y_1, z^0 - z_1, R_1^0 \}。$$

最终可得到移动用户的位置表达式:

$$\mathbf{z}_p = \pm \sqrt{\mathbf{z}_a'} + \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

再根据位置先验信息确定移动用户的位置。

3 Kalman 滤波

根据 TDOA 定位原理,在 TDOA 测量值的误差比较小时,Chan 算法具有最优的估计性能,但随着 TDOA 测量值的误差增加,算法的性能迅速下降。因此,在利用 Chan 算法定位中,如果能根据获得的 TDOA 测量值,计算得到移动终端与各基站的距离或距离差 $R_{i,1}$ 的准确值,就可以计算出移动终端的精确位置。Kalman 滤波^[7]是一种递推估计算法,其基本原理是通过 $k-1$ 时刻推测出 k 时刻的估计值 $X(k)$,并使估计值的均方差最小。因此,采用 Kalman 滤波算法,对由 TDOA 获得的距离差 $R_{i,1}$ 进行了预测估计,获得更加精确的距离值。

假设在定位期间,移动终端的位置不变,获得多次 $R_{i,1}$ 值,其真实值恒定不变,在测量过程中真实值受到加性噪声 $n(k)$ 的干扰,任意两个不同时刻的噪声互不相关。根据 Kalman 滤波理论,建立系统状态估计,设系统状态方程和参数方程分别为:

$$X(k) = X(k-1) \quad (12)$$

$$Z(k) = X(k) + n(k) \quad (13)$$

式中, $X(k)$ 表示 k 时刻的 $R_{i,1}$ 真实值, $Z(k)$ 是 k

时刻的 $R_{i,1}$ 观测值, $X(k)$ 的最佳估计可以由 Kalman 滤波方程给出:

状态一步预测:

$$\hat{X}(k, k-1) = \hat{X}(k-1) \quad (14)$$

状态估计:

$$\hat{X}(k) = \hat{X}(k, k-1) + [\hat{Z}(k) - \hat{X}(k, k-1)]K(k) \quad (15)$$

滤波增益:

$$K(k) = P(k, k-1)[P(k, k-1) + \sigma^2]^{-1} \quad (16)$$

预测误差协方差:

$$P(k, k-1) = P(k-1) \quad (17)$$

估计误差协方差:

$$P(k) = [1 - K(k)]P(k, k-1) \quad (18)$$

因此, Kalman 滤波方程, 只要给定初值 $\hat{X}(0)$ 和 $P(0)$, 由 k 时刻的观测值, 就可以计算得出 k 时刻的状态估计 $\hat{X}(k)$ 的值。起始状态估计为 $\hat{X}(2) = \hat{Z}(2)$, $P(2) = E[X(2) - \hat{X}(2)] = \sigma^2$ 。从第三个 $R_{i,1}$ 观测值开始计算。

在非视距情况下, 算法的具体步骤如下。

(1) 设在相同时间 T 内, 测量 M 次得到 N 个基站的 $N-1$ 组 TDOA 值, 并将其转换为距离差值 $R_{i,1}$, 每组有 M 个 $R_{i,1}$ 测量值 $Z(k)$ 。

(2) 采用 Kalman 滤波算法对 $Z(k)$ 。进行滤波, 得到 $R_{i,1}$ 估计值 $\hat{X}(k)$, 取平稳段的估计值的均值作为滤波优化后的 $R_{i,1}$ 值。

(3) 利用本文提出的三维 Chan 定位算法和优化后的优化后的 $R_{i,1}$ 值, 计算移动终端的位置估计。

4 仿真与性能分析

为了检验应用 Chan 算法在三维空间定位的性能, 在非视距情况下进行了仿真实验。仿真信道模型采用 COST259, 仅考虑信道噪声造成的测量误差对定位的影响, 信道噪声服从高斯分布, 测量误差满足均值为 0, 方差为 30 m。

小区半径为 3 km, 4 个参与测量的基站分别为

$BS_1(4030, 3000, 0)$ 、 $BS_2(7040, 1000, 0)$ 、 $BS_3(4500, 4000, 0)$ 、 $BS_4(3050, 5120, 1)$, 移动用户(MS)的位置为(1150, 2400, 100), 单位为米。仿真过程中, 测量计算了 100 次基站 BS_1 与基站 BS_i 和移动终端之间的距离差 $R_{i,1}$ ($i=2,3,4$), 如表 1 所示, 并进行了 Kalman 滤波, 得到 Kalman 滤波后的距离差, 如图 1 所示。

表 1 MS 与 BS_i 和 BS_i 之间的距离差(单位:m)

	实际距离	测量均值	测量方差	滤波后
$R_{2,1}$	3 111.4	3 105.2	17.723	3 109.5
$R_{3,1}$	959.4	950.8	20.919	961.7
$R_{4,1}$	375.9	377.3	12.117	376.3

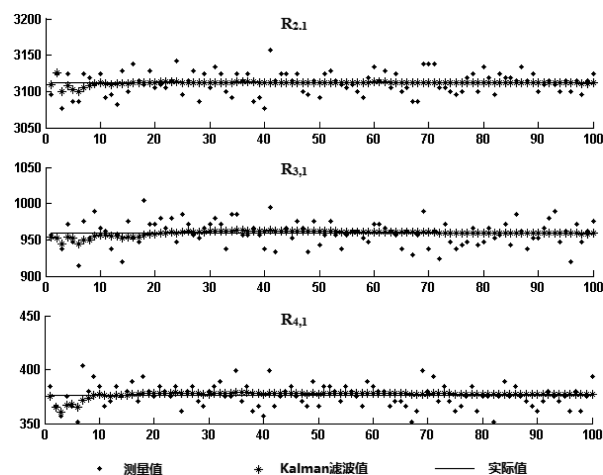


图 1 Kalman 滤波结果

通过滤波后的 $R_{i,1}$, 使用 Chan 算法, 可计算出 MS 的位置为(1149.57, 2399.45, 99.06), 欧式距离误差为 1.179 m。

为了分析 Kalman 滤波的优化性能, 采用均方根误差(RMSE)来对滤波前后定位的精确度进行衡量, RMSE 可由下式得到

$$RMSE = \sqrt{E[(x-X)^2 + (y-Y)^2 + (z-Z)^2]} \quad (19)$$

其中 (x, y, z) 表示 MS 的估计位置, (X, Y, Z) 表示 MS 的实际位置。通过计算, 未经 Kalman 滤波优

化时, RMSE=312.53, 经 Kalman 滤波后, RMSE=107.93, 从而说明, Kalman 滤波可以减少噪声的影响, 进一步提高定位的精度。

5 结语

针对用户精确定位的需求, 本文将二维定位算法推广到三维, 分析推导了基于 Chan 算法的 TDOA 定位技术, 并使用了 Kalman 滤波方法对测量的距离值进行了优化, 使定位更加精确。仿真结果表明, 通过优化后的, 能够得到较高的定位精度, 本文使用的方法是有效、可行的, 为工程实践提供一种理论参考, 并进一步提高了 Chan 算法的实用性。 **MSTT**

参考文献

- [1] 陈维克, 李文峰, 首珩等. 基于 RSSI 的无线传感器网络加权质心定位算法 [J]. 武汉理工大学学报 (交通科学与工程版), 2006, 30 (2): 265-268.
- [2] Yang K, An J, Bu X, et al. Constrained Total Least-Squares Location Algorithm Using Time-Difference-of-Arrival Measurements [J]. Vehicular Technology, IEEE Transactions on, 2010, 59(3): 1558-1562.
- [3] 蔚娜. 蜂窝网络中基于 TDOA 的无线定位算法研究 [D]. 哈尔滨工程大学, 2005.
- [5] 史小红. 基于 TDOA 的无线定位方法及其性能分析 [J]. 东南大学学报 (自然科学版), 2013, 43(2): 252-257.
- [5] Schau H, Robinson A. Passive source localization employing intersecting spherical surfaces from time-of-arrival differences [J]. Acoustics, Speech and Signal Processing, IEEE Transactions on, 1987, 35 (8): 1223-1225.
- [6] Chan Y T, Ho K C. A simple and efficient estimator for hyperbolic location [J]. Signal Processing, IEEE Transactions on, 1994, 42(8): 1905-1915.
- [7] 马攀, 文鸿雁. 离散卡尔曼滤波用于 GPS 动态变形数据处理 [J]. 桂林工学院学报, 2002, (3): 234-238.
- [1] 陈维克, 李文峰, 首珩等. 基于 RSSI 的无线传感器网络加权质心定位算法 [J]. 武汉理工大学学报 (交通科学与工程版), 2006, 30 (2): 265-268.
- [5] Choi I, Lee B, Jeon H, et al. VSCCN: CCN with a very simple control plane [C]. Advanced Communication Technology (ICACT), 2012 14th International Conference on. IEEE, 2012: 690-693.
- [6] Dai H, Lu J, Wang Y, et al. A two-layer intra-domain routing scheme for Named Data Networking [C]. Global Communications Conference (GLOBECOM), 2012 IEEE. IEEE, 2012: 2815-2820.
- [7] Cianfrani A, Eramo V, Listanti M, et al. An OSPF-integrated routing strategy for QoS-aware energy saving in IP backbone networks [J]. Network and Service Management, IEEE Transactions on, 2012, 9 (3): 254-267.
- [8] Carofiglio G, Gallo M, Muscariello L, et al. Modeling data transfer in content-centric networking [C]. Proceedings of the 23rd International Teletraffic Congress. International Teletraffic Congress, 2011: 111-118.
- [9] Ul Haque M, Pawlikowski K, Willig A, et al. Performance analysis of blind routing algorithms over content centric networking architecture [C]. Computer and Communication Engineering (ICCCE), 2012 International Conference on. IEEE, 2012: 922-927.
- [10] Tortelli M, Grieco L A, Boggia G. Performance Assessment of Routing Strategies in Named Data Networking [J]. GTTI 2013 Session on Telecommunication Networks. IEEE ICNP, 2013.

(上接第 35 页)

- [11] Carofiglio G, Gallo M, Muscariello L, et al. Multipath congestion control in content-centric networks [J]. IEEE NOMEN, 2013.
- [12] Carofiglio G, Gallo M, Muscariello L, et al. Optimal Multipath Congestion Control and Request Forwarding in Information-Centric Networks [J]. IEEE International Conference on Network Protocols (ICNP), 2013.
- [13] Carofiglio G, Gallo M, Muscariello L. ICP: Design and evaluation of an interest control protocol for content-centric networking [C]. Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS), 2012 IEEE Conference on. IEEE, 2012: 304-309.
- [14] Katsikogiannis G, Mitropoulos S, Douligieris C. Policy-based QoS management for SLA-driven adaptive routing [J]. Communications and Networks, Journal of, 2013, 15(3): 301-311.

- [2] Yang K, An J, Bu X, et al. Constrained Total Least-Squares Location Algorithm Using Time-Difference-of-Arrival Measurements [J]. Vehicular Technology, IEEE Transactions on, 2010, 59(3): 1558-1562.
- [3] 蔚娜. 蜂窝网络中基于 TDOA 的无线定位算法研究 [D]. 哈尔滨工程大学, 2005.
- [5] 史小红. 基于 TDOA 的无线定位方法及其性能分析 [J]. 东南大学学报 (自然科学版), 2013, 43(2): 252-257.
- [5] Schau H, Robinson A. Passive source localization employing intersecting spherical surfaces from time-of-arrival differences [J]. Acoustics, Speech and Signal Processing, IEEE Transactions on, 1987, 35 (8): 1223-1225.
- [6] Chan Y T, Ho K C. A simple and efficient estimator for hyperbolic location [J]. Signal Processing, IEEE Transactions on, 1994, 42(8): 1905-1915.
- [7] 马攀, 文鸿雁. 离散卡尔曼滤波用于 GPS 动态变形数据处理 [J]. 桂林工学院学报, 2002, (3): 234-238.

作者简介

李招华: 北京信息科技大学硕士研究生, 主要从事无线通信技术、模式识别。

汪毓铎: 北京信息科技大学教授, 主要从事信号的采集、传输与处理。

邵青: 工业和信息化部电信研究院工程师, 主要从事天线设计与建模, 电磁场安全性评估和数值计算方法研究。

ing Strategies in Named Data Networking [J]. GTTI 2013 Session on Telecommunication Networks. IEEE ICNP, 2013.

- [11] Carofiglio G, Gallo M, Muscariello L, et al. Multipath congestion control in content-centric networks [J]. IEEE NOMEN, 2013.
- [12] Carofiglio G, Gallo M, Muscariello L, et al. Optimal Multipath Congestion Control and Request Forwarding in Information-Centric Networks [J]. IEEE International Conference on Network Protocols (ICNP), 2013.
- [13] Carofiglio G, Gallo M, Muscariello L. ICP: Design and evaluation of an interest control protocol for content-centric networking [C]. Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS), 2012 IEEE Conference on. IEEE, 2012: 304-309.
- [14] Katsikogiannis G, Mitropoulos S, Douligieris C. Policy-based QoS management for SLA-driven adaptive routing [J]. Communications and Networks, Journal of, 2013, 15(3): 301-311.

作者简介

张宏宇: 重庆邮电大学信息与通信工程和光纤通信技术重点实验室硕士研究生, 研究方向为未来互联网。

牛翠翠: 重庆邮电大学信息与通信工程和光纤通信技术重点实验室硕士研究生, 研究方向为未来互联网。

吴震: 重庆邮电大学信息与通信工程和光纤通信技术重点实验室硕士研究生, 研究方向为未来互联网。