

严重遮挡非视距环境下的三维定位方法

肖竹, 陈杰, 王东, 李晓鸿, 李仁发

(湖南大学 信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 在严重遮挡非视距环境中, 由于定位源与未知节点之间被障碍物遮挡而无法检测直射路径, 极大地制约了无线定位方法的应用。提出一种能够规避直射路径遮挡现象的三维定位框架, 利用单次反射路径和方位信息, 论证了定位源、未知节点和散射体的三维空间位置关系, 提出了基于最小二乘准则的空间位置优化算法, 并推导出空间位置的求解方法。同时对定位算法进行均方根误差 (RMSE, root mean-square error) 的理论分析。通过蒙特卡罗仿真实验分析了三维定位框架中距离和方位偏差对算法性能的影响, 仿真结果与算法的 RMSE 理论结果相符, 说明了三维非视距定位算法的有效性。

关键词: 非视距; 遮挡环境; 三维定位; 空间位置优化

中图分类号: TP393

文献标识码: A

Three-dimensional localization under severely obstructed NLOS environment

XIAO Zhu, CHEN Jie, WANG Dong, LI Xiao-hong, LI Ren-fa

(College of Computer Science and Electronics Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: In the severely obstructed NLOS(non-line-of-sight) environment, obstacles between the UN (unknown node) and RS (reference station) made the DP (direct path) undetectable. It greatly restricted the application of wireless localization method. A three-dimensional localization scheme, which utilized the distance and orientation information of single-bounce signal, was proposed to evade the DP blocking effect in three-dimensional NLOS environment. Within the proposed localization scheme, three-dimensional spatial location relationship among the RS, UN and scatterers was proven. An optimization algorithm based on least mean square was proposed and the mathematical solution to the position relationship was derived. Furthermore, the performance of algorithm is studied by using RMSE (root mean-square error) analysis. Through Monte-Carlo simulations, how distance and orientation deviation of three-dimensional localization frame affect performance of algorithms is examined. It is also demonstrated that the analytical results closely match the simulations, which verifies the effectiveness of the proposed three-dimensional NLOS localization algorithm.

Key words: non-line-of-sight; obstructed environment; three-dimensional localization; spatial location optimization

1 引言

随着信息技术的不断发展, 位置信息已经成为当前社会众多行业不同应用场合中的重要基础信

息^[1,2]。利用无线定位技术, 确定移动终端或其持有者的距离和位置信息, 实现对物品或其所有者的定位、跟踪和监控等功能, 在无线通信、移动计算、传感器网络和物联网等领域中都有广泛的应用价

收稿日期: 2014-03-25; 修回日期: 2014-09-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61301148, 61272061); 国家教育部博士点基金资助项目(20120161120019, 20130161110002); 湖南省自然科学基金资助项目(10JJ5069, 14JJ7023); 中央高校科研基本业务费基金资助项目(531107040263, 531107040276); 湖南大学“青年教师成长计划”基金资助项目

Foundation Items: The National Natural Science Foundations of China (61301148,61272061); The Ph. D Programs Foundation of Ministr Education of China (20120161120019, 20130161110002); The Natural Science Foundation of Hunan Province (10JJ5069, 14JJ7023); The Fundamental Research Funds for the Central Universities of China (531107040263,531107040276); The Young Lecturer's Growth Project in Hunan Universities of China

值^[3,4]。

无线定位可通过测距和测向来完成，一般可以分为：基于到达角度估计(AOA, angle of arrival)、基于接收信号强度(RSS, received signal strength)、基于到达时间/时间和/时间差估计(TOA, time of arrival /TSOA, time sum of arrival/TDOA, time difference of arrival)。在这些方法中，直射路径(DP, direct path)直接反映定位双方的传播时延、直线距离和方位^[5]，是关键的首达路径，也是判断信号强弱的重要分量。在无线定位应用环境中，由于存在类型多样的散射体和障碍物，会导致非视距(NLOS, non-line-of-sight)，造成 DP 被遮挡，严重降低定位方法的性能和位置解算精度^[6]。

NLOS 可以进一步划分为 NDDP(non-dominant direct path)和 UDP(undetectable direct path)2 种类型^[7]，NDDP 表示尽管存在轻微遮挡仍能检测 DP，但 DP 不再表现为最强路径，其他多径分量容易造成 DP 误检现象；UDP 则对应遮挡严重的 NLOS 环境，此时无法检测到 DP，即定位双方完全“不可见”，会造成极大误差，并可能导致无法完成定位过程。同时，在一些实际应用场合需要获取三维位置信息，大部分研究针对二维定位，文献[8]指出，对于遮挡严重的 NLOS 环境，许多适合于二维的定位方法无法直接应用于三维场景。

本文研究严重遮挡 NLOS 环境下的三维定位问题，给出一种能够灵活利用散射体的定位框架，利用空间位置关系将其推广至三维定位。设计适用于三维场景的空间位置优化算法，通过对均方根误差(RMSE, root mean-square error)的理论推导和仿真实验，提出的方法具有较好的定位效果，能适用于复杂的 NLOS 定位环境。

2 相关工作

遮挡环境中形成的 NLOS 现象极大制约了无线定位性能与精度。NLOS 无线定位与理想的视距(LOS, line-of-sight)场景存在较大区别：在相同噪声和干扰等条件下，其他多径分量对 DP 的影响程度要明显高于 LOS 情形，带来的定位误差也高于 LOS 情形，且往往是正偏差，如带来附加时延等。NLOS 环境无线定位的主要策略是采用 NLOS 鉴别和 NLOS 误差消除方法。如利用多径信号幅度的统计特征^[9]、非实时的信道传播特征^[10]来进行 NLOS 鉴别，结合卡尔曼滤波或模式识别等理论，目的是尽

量利用 LOS 路径进行定位，剔除 NLOS 带来的负面影响^[11]，这类方法 LOS 参考节点选取越多，定位效果越好，但对于严重遮挡的 NLOS 环境，LOS 路径（等同于 DP）遭遇严重衰减而无法检测时则不能适用。

另一种思路是对遮挡环境和 NLOS 场景的误差建模，文献[12]研究了遮挡现象形成的传播时延误差限，设计预修正算法来降低 NLOS 定位误差。文献[13]根据遮挡环境下 NLOS 误差的先验概率分布，将 LOS 和 NLOS 定位建模为规划约束问题来求解。文献[14]将 NLOS 定位误差建模成高斯混合过程，利用粒子群优化和优选残差加权算法来消除 NLOS 误差。文献[15]将遮挡环境定位建模为非参数回归过程，从而降低 NLOS 对定位性能的影响。对于不同的 NLOS 定位应用场景，这类方法难以对造成 NLOS 的遮挡机理给出具备普遍意义的描述。

多种定位方法的联合使用也是严重遮挡环境下的常用策略之一。如文献[16]研究 TDOA 和 RSS 的联合估计算法，文献[17]考虑 NLOS 环境中可能参与定位的散射体，但需要预知散射体的位置和分布信息，或要求参与定位的散射体与定位双方处于同一平面。总之，遮挡环境中各类障碍物对 DP 的遮挡效应，从原理上限制了 AOA 和 TOA 等定位方法的使用，对于 UDP 情形，由于 DP 无法检测，将给最终定位结果带来极大误差，当考虑定位方法中空间方位和距离的相互关系时，难以推广到三维定位情形。

3 NLOS 场景下三维定位方法

本文针对严重遮挡的 NLOS 环境，认为散射体能为无线定位提供有用信息，通过研究定位源(RS, reference station)、未知节点(UN, unknown node)和散射体之间的空间位置关系，将被遮挡的 DP 检测转化为非直射路径检测问题，且无需获取散射体本身的位置分布等先验知识，结合发射角度估计(AOD, angle of departure)和 AOA 方法分别获得发射信号角度和接收信号角度。巧妙地规避严重 NLOS 场景下障碍物的遮挡现象，能完成直接方式三维场景下的 NLOS 定位，根据空间位置关系推导出位置优化算法。

3.1 三维定位算法框架

严重遮挡的 NLOS 环境如图 1 所示，DP 由于受到定位源(RS)与未知节点(UN)间障碍物阻挡，衰

减过大而无法检测。图 2 给出了严重遮挡 NLOS(即 UDP)环境中基于非直射路径的三维定位方案,如图 2 所示,设 RS 以空间角度 $(\alpha_{D,i}, \beta_{D,i})$ 发射定位信号,在该方向上存在散射体 S'_i , 设 RS 与 S'_i 的距离为 r'_i , 信号经由 S'_i 反射,以空间角度 $(\alpha_{A,i}, \beta_{A,i})$ 到达 UN' 端。设 S'_i 与 UN' 的距离为 $l'_i=(d_i-r'_i)$, 则信号从 RS 出发经由 S'_i 反射到达 UN' 的传播距离为 $d_i=l'_i+r'_i$ 。由于散射体的位置未定,若 $(\alpha_{D,i}, \beta_{D,i})$ 方向上散射体位于图 2 中 S''_i , 此时可认为散射体反射特性不变, S''_i 反射的信号仍然以 $(\alpha_{A,i}, \beta_{A,i})$ 到达未知节点端(设为 UN'')。类似地, 设 S''_i 与 RS 和 UN'' 的距离为 r''_i 和 l''_i , 根据空间位置关系可得 $d_i=r''_i+l''_i$ 。

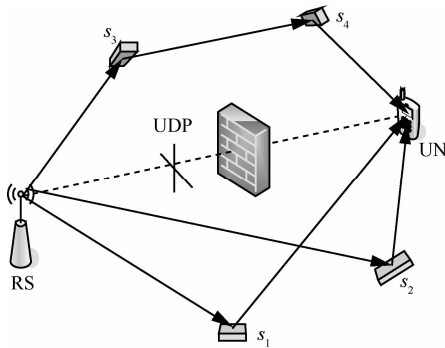


图 1 严重遮挡的 NLOS (UDP)

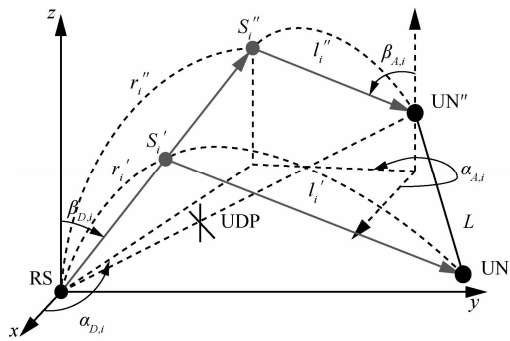


图 2 严重遮挡非视距的三维定位方案

其中, d_i 表示经散射体反射的非直射路径的传播距离, 可通过非直射路径的 TOA 方法求得。空间方位角度信息包括 2 部分, 其中可利用 AOA 方法获得 UN 端的到达角度^[18], 发射角度可利用方向性天线, 或通过等效天线阵列设计 AOD 估计方法获得^[19]。上述分析表明, 若能测得一组特定的 $(d_i, \alpha_{D,i}, \beta_{D,i}, \alpha_{A,i}, \beta_{A,i})$ 值, 就能将 UN' (或 UN'') 确定在图 2 中空间直线 L 上。当 RS 变换发射角度

$(\alpha_{D,i}, \beta_{D,i})$, UN 接收其他散射体反射的信号, 进而测得另一组不同的 $(d_i, \alpha_{D,i}, \beta_{D,i}, \alpha_{A,i}, \beta_{A,i})$ 值, 同理可将 UN 确定在另一直线上, 由于发射角度不同, 该直线将与 L 存在交点, 这说明在该三维定位方法中, 不再依赖直射路径, 也无需散射体位置的先验信息, 理论上获得 2 组不同的 $(d_i, \alpha_{D,i}, \beta_{D,i}, \alpha_{A,i}, \beta_{A,i})$ 即可完成 UDP 情形下的最终定位解算。

3.2 空间位置关系推导

本节探讨 RS、UN 以及散射体 S_i 之间空间位置关系。设 N 条信号从定位源 RS 发出, 遇到散射体反射后被 UN 接收, 图 2 给出了其中第 i 传播路径, 记 $i=1, \dots, N$ 。定位源 RS 的位置已知, 记为 $P_R=(x_R, y_R, z_R)^T$, 未知节点 UN 的位置 $P_U=(x_U, y_U, z_U)^T$ 和散射体的位置 $P_{S,i}=(x_{S,i}, y_{S,i}, z_{S,i})^T$ 是未知的, 其中, $P_{S,i}$ 表示第 i 条非直射(单次反射)路径经过的散射体 S_i 坐标。利用 AOD 方法和 AOA 技术可分别获得定位信号的发出角度 $(\alpha_{D,i}, \beta_{D,i})$ 和接收角度 $(\alpha_{A,i}, \beta_{A,i})$ 。利用 TOA 可以测出对于非直射路径的传播时延, 进而求得非直射路径的传播距离 d_i 。由图 2 中关系可知, 其中, d_i 由 RS 到散射体段 r_i 和从散射体到未知节点 UN 段 $l_i=(d_i-r_i)$ 组成。

根据空间几何的位置关系, 可建立未知节点 P_U 、定位源 P_R 与第一段路径 r_i 和第二段路径 $l_i=(d_i-r_i)$ 的向量方程

$$P_U = P_R + r_i \begin{pmatrix} \sin \beta_{D,i} \cos \alpha_{D,i} \\ \sin \beta_{D,i} \sin \alpha_{D,i} \\ \cos \beta_{D,i} \end{pmatrix} - (d_i - r_i) \begin{pmatrix} \sin \beta_{A,i} \cos \alpha_{A,i} \\ \sin \beta_{A,i} \sin \alpha_{A,i} \\ \cos \beta_{A,i} \end{pmatrix} \quad (1)$$

化简后, 可得到反映几何关系的方程组见式(2)。

由于已知参数 $\theta_i=(d_i, \alpha_{D,i}, \beta_{D,i}, \alpha_{A,i}, \beta_{A,i})^T$ 和定位源 RS 点坐标 $P_R=(x_R, y_R, z_R)^T$ 。在式(2)中, 有 x_U 、 y_U 和 z_U 共 3 个未知量, 由线性代数理论, 通过 2 个方程求 3 个未知数, 属于欠定方程, 方程组有无穷解。因此, 如果已知 N 条非直射路径且 $N \geq 2$ 时, 可以得到 $2N$ 个方程, 属于适定或超定方程, 可求解出 x_U 、 y_U 和 z_U 。设从 RS 有 n 条非直射路径被 UN 接收, 其中 $n=1, \dots, N$, 其定位方程的矩阵记法如下

$$\begin{pmatrix} M_{1,1} & M_{1,2} & M_{1,3} \\ M_{2,1} & M_{2,2} & M_{2,3} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ M_{(2N-1),1} & M_{(2N-1),2} & M_{(2N-1),3} \\ M_{2N,1} & M_{2N,2} & M_{2N,3} \end{pmatrix} (P_U - P_R) = \mathbf{B} \quad (2)$$

其中, $\mathbf{B}=(b_1, b_2, \dots, b_{2N-1}, b_{2N})^T$, 式(2)中各元素表示如下

$$\begin{cases} M_{(2n-1),1} = M_{2n,2} = (\cos \beta_{D,n} + \cos \beta_{A,n}) \\ M_{(2n-1),2} = M_{2n,1} = 0 \\ M_{(2n-1),3} = -(\sin \beta_{D,n} \cos \alpha_{D,n} + \sin \beta_{A,n} \cos \alpha_{A,n}) \\ M_{2n,3} = -(\sin \beta_{D,n} \sin \alpha_{D,n} + \sin \beta_{A,n} \sin \alpha_{A,n}) \\ b_{2n-1} = d_n (\sin \beta_{D,n} \cos \alpha_{D,n} \cos \beta_{A,n} - \sin \beta_{A,n} \cos \alpha_{A,n} \cos \beta_{D,n}) \\ b_{2n} = d_n (\sin \beta_{D,n} \sin \alpha_{D,n} \cos \beta_{A,n} - \sin \beta_{A,n} \sin \alpha_{A,n} \cos \beta_{D,n}) \end{cases} \quad (3)$$

根据空间几何位置关系, 在严重遮挡的 NLOS 环境中, 借助散射体的反射作用但无需获得其位置, 定位方法不再依赖于 DP, 结合非直射单次反射路径的传播距离和角度方位信息, 即获知参数 $\Theta_i=(d_i, \alpha_{D,i}, \beta_{D,i}, \alpha_{A,i}, \beta_{A,i})^T$ 和定位源 RS 坐标 $P_R=(x_R, y_R, z_R)^T$, 可将未知节点 UN 的位置 P_U 定位在三维空间的一条线段之上。若能获知多条不同的非直射路径, 可得多条这样的线段, 求出它们的交点获得未知节点坐标 P_U 。

4 三维空间位置优化方法

4.1 基于 LS 准则的位置优化算法

在实际定位应用时, 获取定位参数 $\Theta_i=(d_i, \alpha_{D,i}, \beta_{D,i}, \alpha_{A,i}, \beta_{A,i})^T$ 存在测量误差, 一般可认为误差符合高斯分布^[7,14]。本文采用最小二乘准则 (LS, least square) 对空间位置设计优化算法。考虑到实际定位中存在误差的发出角度为 $(\hat{\alpha}_{D,i}, \hat{\beta}_{D,i})$, 接收角度为 $(\hat{\alpha}_{A,i}, \hat{\beta}_{A,i})$ 和传播距离为 \hat{d}_i , 根据式(3)可

得测量方程, 见式(4)。

$$\hat{P}_U = \hat{M}^{-1} \hat{\mathbf{B}} + P_R \quad (4)$$

此时, 式(4)极有可能无法获得最优解, 或者考虑信号的统计特性时其最优解求解过程较为复杂。这里根据 LS 准则, 令 $p = P_U - P_R$, 位置解算过程可等同为最小二乘估计过程

$$\hat{p} = \arg \min \|\hat{\mathbf{B}} - \hat{M}\hat{p}\|^2 \quad (5)$$

未知节点 UN 的位置可以由 $\hat{P}_U = \hat{p} + P_R$ 进行估计得出, 基于 LS 准则可求得 UN 的估计坐标 \hat{P}_U 。

$$\hat{P}_U = (\hat{M}^T \hat{M})^{-1} \hat{M}^T \hat{\mathbf{B}} + P_R \quad (6)$$

在三维定位算法推导中利用了散射体的位置, 但仅作为中间变量, 无需获得其位置坐标 $P_{S,n}$ 。值得注意的是, 直射信号 DP 可以看作单次反射信号的特例, 是从 RS 到散射体的第一段路径 $r_i = d_i$, 从散射体到 UN 的第二段路径 $l_i = 0$ 的情况, 同样利用上述方法进行定位, 因此该 NLOS 定位方案也适用于 LOS 环境。

当存在 N 条经过一次反射的 NLOS 路径时, 设其参数的精确值为 $\Theta_i=(d_i, \alpha_{D,i}, \beta_{D,i}, \alpha_{A,i}, \beta_{A,i})^T$, 其中, $i=1, 2, \dots, N$, $\vartheta=(\Theta_1^T, \Theta_2^T, \dots, \Theta_N^T)^T$, 利用式(7), 可以推导出未知节点 UN 位置的最小二乘最优值 $(\hat{x}_U, \hat{y}_U, \hat{z}_U)^T$, 如式(8)所示, 其具体推导过程参见附录。

式(8)中各个变量 $(A_1, A_2, A_3, A_4, B_1, B_2, B_3, B_4, C_1, C_2, C_3, C_4)$ 如式(9)所示。其中, $M_{2i-1,j}$ 、 $M_{2i,j}$ 见式(3), 且 $i=1, 2, \dots, N, m, j=1, 2, 3$ 。

$$\begin{cases} (\cos \beta_{D,i} + \cos \beta_{A,i})(x_U - x_R) - (\sin \beta_{D,i} \cos \alpha_{D,i} + \sin \beta_{A,i} \cos \alpha_{A,i})(z_U - z_R) \\ = d_i (\sin \beta_{D,i} \cos \alpha_{D,i} \cos \beta_{A,i} - \sin \beta_{A,i} \cos \alpha_{A,i} \cos \beta_{D,i}) \\ (\cos \beta_{D,i} + \cos \beta_{A,i})(y_U - y_R) - (\sin \beta_{D,i} \cos \alpha_{D,i} + \sin \beta_{A,i} \cos \alpha_{A,i})(z_U - z_R) \\ = d_i (\sin \beta_{D,i} \sin \alpha_{D,i} \cos \beta_{A,i} - \sin \beta_{A,i} \sin \alpha_{A,i} \cos \beta_{D,i}) \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \hat{x}_U = \frac{A_4 B_2 C_3 - A_4 B_3 C_2 - A_3 B_2 C_4 - A_2 B_4 C_3 + A_2 B_3 C_4 + A_3 B_4 C_2}{A_1 B_2 C_3 - A_1 B_3 C_2 - A_3 B_2 C_1 - A_2 B_1 C_3 + A_2 B_3 C_1 + A_3 B_1 C_2} + x_R \\ \hat{y}_U = \frac{A_4 B_1 C_3 - A_4 B_3 C_1 - A_3 B_1 C_4 - A_1 B_4 C_3 + A_3 B_4 C_1 + A_1 B_3 C_4}{A_2 B_1 C_3 - A_2 B_3 C_1 - A_3 B_1 C_2 - A_1 B_2 C_3 + A_3 B_2 C_1 + A_1 B_3 C_2} + y_R \\ \hat{z}_U = \frac{A_4 B_1 C_2 - A_4 B_2 C_1 + A_2 B_4 C_1 - A_1 B_4 C_2 + A_1 B_2 C_4 - A_2 B_1 C_4}{A_3 B_1 C_2 - A_3 B_2 C_1 + A_2 B_3 C_1 - A_1 B_3 C_2 + A_1 B_2 C_3 + A_2 B_1 C_3} + z_R \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} A_m = \sum_{i=1}^N M_{2i-1,1} M_{2i-1,m} + \sum_{i=1}^N M_{2i,1} M_{2i,m}, & A_4 = \sum_{i=1}^N M_{2i-1,1} b_{2i-1} + \sum_{i=1}^N M_{2i,1} b_{2i} \\ B_m = \sum_{i=1}^N M_{2i-1,2} M_{2i-1,m} + \sum_{i=1}^N M_{2i,2} M_{2i,m}, & B_4 = \sum_{i=1}^N M_{2i-1,2} b_{2i-1} + \sum_{i=1}^N M_{2i,2} b_{2i} \\ C_m = \sum_{i=1}^N M_{2i-1,3} M_{2i-1,m} + \sum_{i=1}^N M_{2i,3} M_{2i,m}, & C_4 = \sum_{i=1}^N M_{2i-1,3} b_{2i-1} + \sum_{i=1}^N M_{2i,3} b_{2i} \end{cases} \quad (9)$$

4.2 空间位置优化算法的 RMSE 分析

本节对三维定位方法中空间位置优化算法的均方根误差 (RMSE) 值进行理论分析, 以评估定位算法参量对定位性能的影响。定义参数矢量 $\hat{\vartheta}_N = (\hat{\theta}_1^T, \hat{\theta}_2^T, \dots, \hat{\theta}_n^T)^T$ 为独立高斯分布的估计值, 各参数的标准差为 $\sigma_i = (\sigma_{d_i}, \sigma_{\alpha_{D,i}}, \sigma_{\beta_{D,i}}, \sigma_{\alpha_{A,i}}, \sigma_{\beta_{A,i}})$, 其中, $i=1,2,\dots,N$ 。当参数 $\hat{\vartheta}_N = (\hat{\theta}_1^T, \hat{\theta}_2^T, \dots, \hat{\theta}_n^T)^T$ 的方差较小时, 通过 Taylor 分解, 此时 UN 的估计坐标可以近似表示为

$$P_u(\hat{\vartheta}_N) \approx P_u(\vartheta_N) + \nabla P_u(\vartheta_N)(\hat{\vartheta}_N - \vartheta_N) \quad (10)$$

其中, $\nabla P_u(\vartheta_N) = \begin{pmatrix} \nabla x_u(\vartheta) \\ \nabla y_u(\vartheta) \\ \nabla z_u(\vartheta) \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{3 \times 5N}$ 为 $P_u(\hat{\vartheta}_N)$ 在 ϑ_N 处

的雅克比矩阵^[20]。梯度矩阵 $\nabla x_u(\vartheta)$ 、 $\nabla y_u(\vartheta)$ 和 $\nabla z_u(\vartheta)$ 为 x_u 、 y_u 和 z_u 对 $\theta_i = (d_i, \alpha_{D,i}, \beta_{D,i}, \alpha_{A,i}, \beta_{A,i})^T$ 分别求偏导获得, 其中, $i=1,2,\dots,N$ 。当参数的方差很小时, UN 的估计坐标 $P_u(\hat{\vartheta}_N)$ 的协方差矩阵 $R_{P_u} = E((\hat{P}_U - P_U)(\hat{P}_U - P_U)^T)$ 可表示如下

$$R_{P_u} \approx \nabla P_u(\vartheta_N) \text{diag}(\sigma_1^2, \sigma_2^2, \dots, \sigma_N^2) \nabla P_u^T(\vartheta_N) \quad (11)$$

此时, 取协方差矩阵的特征值, 就可以获得空间位置优化算法的 RMSE 理论值 $\sigma_U = \sqrt{\frac{\text{Tr}(R_{P_u})}{3}}$ 。

5 仿真实验及分析

5.1 RMSE 理论值的仿真

通过仿真实验验证定位算法 RMSE 的理论分析, 设置三维定位空间范围 $120 \text{ m} \times 120 \text{ m} \times 120 \text{ m}$, 信号从定位源 RS 发出, 遇到散射体 S 后反射被未知节点 UN 接收, 表 1 列出了散射点 S、RS 和 UN 的位置坐标。实验中假定这 5 条不同传播路径的测量参数都有相等的归一化估计误差方差, 例如: $\sigma_{d_i}^2 = \sigma_d^2$, $\sigma_{\alpha_{D,i}}^2 = \sigma_{\alpha_D}^2$, $\sigma_{\beta_{D,i}}^2 = \sigma_{\beta_D}^2$, $\sigma_{\alpha_{A,i}}^2 = \sigma_{\alpha_A}^2$, $\sigma_{\beta_{A,i}}^2 = \sigma_{\beta_A}^2$, 其中, $i=1,2,3,4,5$ 。

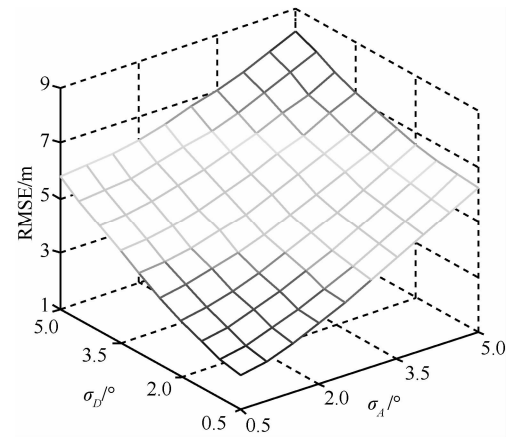
表 1 节点分布坐标 (单位: m)

节点	坐标	节点	坐标
定位源	(-50,0,0)	未知节点	(20,10,5)
散射点 S_1	(-30,-15,-10)	散射点 S_2	(-25,-10,-30)
散射点 S_3	(-25,15,-15)	散射点 S_4	(10,15,10)
散射点 S_5	(10,30,20)		

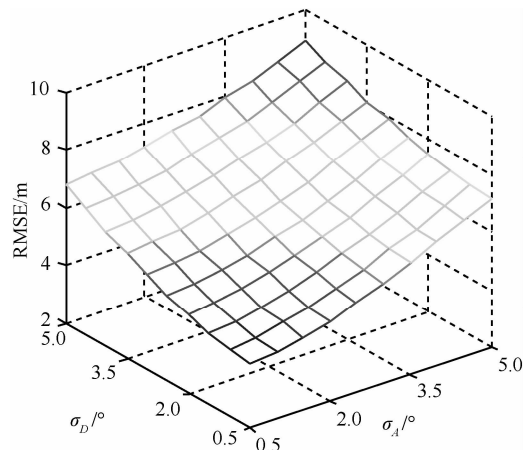
在仿真实验中, 为了研究 NLOS 路径的各个测

量参数对 RMSE 性能的影响, 采用第 4 节推导的 RMSE 理论值公式进行验证对比。各测量参数的标准偏差为 σ_d 、 σ_{α_D} 、 σ_{β_D} 、 σ_{α_A} 和 σ_{β_A} 。当只采用 5 条 NLOS 路径中的 2 条时, 有 C_5^2 个非直射 NLOS 路径的两两组合。不同的组合可能导致不同的 RMSE 性能。通过求不同路径组合下的 RMSE 性能的平均值, 获得采用相同数目的 NLOS 路径时的平均性能。

图 3 和图 4 给出了 RMSE 的理论分析值, 反映了估计参数的偏差对 RMSE 性能的影响。图 3(a) 和图 3(b) 分别表示在 $\sigma_d = 5 \text{ m}$ 和 $\sigma_d = 10 \text{ m}$, $\sigma_D = \sigma_{\alpha_D} = \sigma_{\beta_D}$ 、 $\sigma_A = \sigma_{\alpha_A} = \sigma_{\beta_A}$ 从 0.5° 到 5° 递增时对 RMSE 性能影响。从这 2 幅网状图可以看出, 方位信息的误差增大时, 即 σ_D 和 σ_A 增大时会导致 RMSE 增大。对比图 3(a) 和图 3(b), 若距离信息偏差 σ_d 增大时, 也会增大 RMSE, 从而降低定位性能。



(a) $\sigma_d = 5 \text{ m}$



(b) $\sigma_d = 10 \text{ m}$

图 3 角度偏差对 RMSE 的影响

同时注意到发射端的角度误差的方差 σ_D ，与接收端的角度误差的方差 σ_A 对 RMSE 的性能影响基本一致。结合图 4 中的仿真结果，当 σ_d 从 1.5 m 到 15 m 递增， $\sigma_A = \sigma_D = \sigma_{\text{angle}}$ 从 0.5° 到 5° 递增时，RMSE 的变化更为明显。考虑到定位源、未知节点和散射体的三维空间位置关系，较之距离偏差，方位信息的偏差对最终定位精度的影响较大，这也说明三维空间定位方法对方位信息更为敏感，传播路径的角度误差的方差 σ_{angle} 比 σ_d 对 RMSE 性能有更大影响。

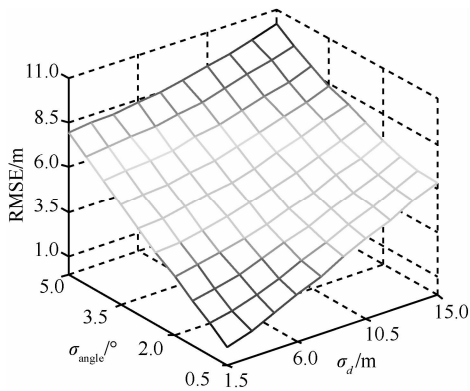


图 4 σ_{angle} 和 σ_d 对 RMSE 的影响

5.2 空间位置优化算法性能

本节采用蒙特卡罗仿真实验来论证三维定位方法 RMSE 理论值推导的正确性，同时考察非直射路径数目 N 对三维空间位置优化算法性能的影响。图 5~图 7 分别给出了 σ_d 、 $\sigma_{\alpha_D} = \sigma_{\beta_D}$ 和 $\sigma_{\alpha_A} = \sigma_{\beta_A}$ 变化，不同路径数目 $N=2,3,4$ 时，定位算法 RMSE 的理论分析值与仿真结果值。如图 5 所示，当方位角度偏差 $\sigma_{\alpha_A} = \sigma_{\beta_A} = \sigma_{\alpha_D} = \sigma_{\beta_D} = 2^\circ$ 时，不同路径数目 N 和 σ_d 对 RMSE 的影响。图 6 和图 7 分别显示了当传输距离偏差 $\sigma_d = 5\text{ m}$ 时，路径数目 N 分别与 $\sigma_{\alpha_D} = \sigma_{\beta_D}$ 和 $\sigma_{\alpha_A} = \sigma_{\beta_A}$ 对算法的 RMSE 性能的影响。

以图 5 中结果为例，利用 3 条非视距路径比使用 2 条非视距路径时的定位性能提升近 34%，使用 4 条信号比 3 条提升近 7%。RMSE 值随参数误差(图 5 中为 σ_d)的增大而上升，参与定位的信号较多时，定位的精度也有所提升，但系统开销增大且存在一定瓶颈效应。在本文提出的定位方案中，采用 LS 准则的线性最优求解。当取 $N=3$ 和 $N=4$ 时，由图 5 和图 6 可看出， $N=4$ 时定位性能稍有提升，但并不显著，而利用 4 条信号需要更多一次的信号发射检测过程。因此相比较而言，当 $N=3$ 时可利用尽可能少的信号

来满足定位时效性的要求。图 6 与图 7 中仿真结果与图 5 基本一致，可得出类似结论。本文定位方案中采用 3 条非直射信号定位，能以较少开销获得不错的定位性能。从图中各仿真曲线可看出，本文定位算法的 RMSE 理论分析与仿真结果基本相符，这表明当估计参数在一定的偏差范围内，所提三维定位算法的 RMSE 理论表达式是基本准确的。

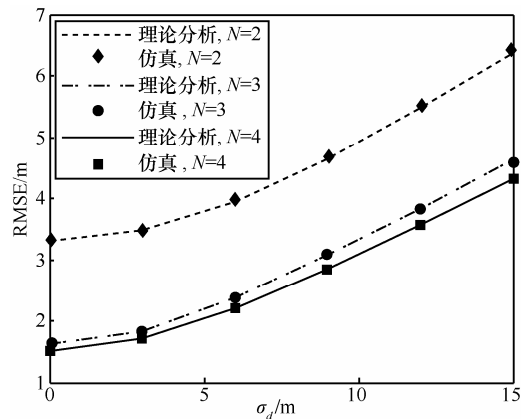


图 5 路径数和 σ_d 对 RMSE 的影响

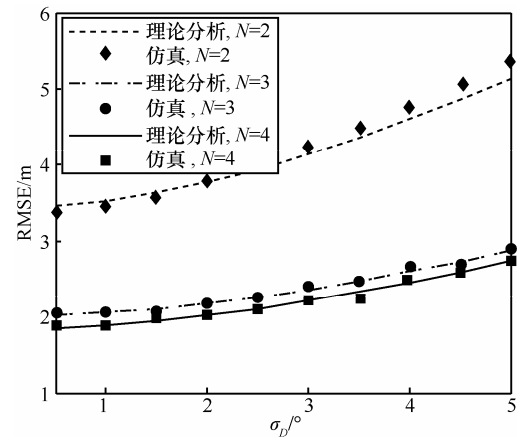


图 6 路径数目和 $\sigma_{\alpha_D} = \sigma_{\beta_D}$ 对 RMSE 的影响

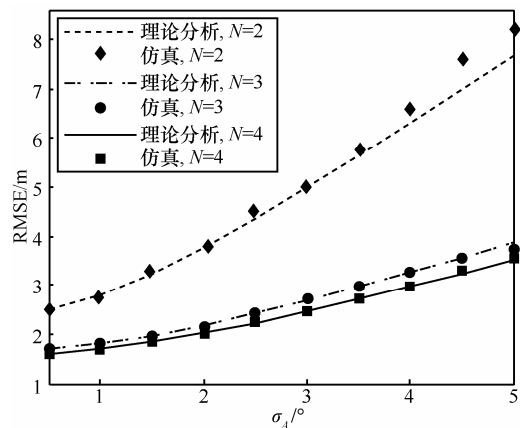


图 7 路径数目和 $\sigma_{\alpha_A} = \sigma_{\beta_A}$ 对 RMSE 的影响

6 结束语

本文研究严重遮挡非视距(NLOS)环境下的三维定位问题。提出一种不再依赖于直射路径(DP)的NLOS定位方法,在三维空间中,该方法借助散射体,但不需获得散射体的位置信息,利用单次反射路径,同时结合方位信息,通过空间位置关系的论证,回避了严重NLOS环境下DP被遮挡的难点问题。设计了三维空间位置优化算法,并给出了基于LS准则的最优化位置估计。对定位算法的RMSE进行理论推导。通过仿真实验分析了定位参数对定位性能的影响,实验仿真结果表明RMSE理论分析与仿真结果相符,可实现空间遮挡环境下的有效定位。在研究中也注意到,在实际场景中,准确获取NLOS路径的空间角度信息仍具挑战性。在严重UDP场景中,多次反射信号会成为定位算法的主要干扰,因此在进一步研究中,还将考虑对多次反射信号的有效剔除方法。

附录 最小二乘最优值推导

为获得式(6)的最小误差即最优位置估计

$$\hat{p} = \arg \min \| \hat{\mathbf{B}} - \hat{M}\hat{p} \|^2 \quad (12)$$

可通过最小化式(13),对UN的三维坐标求偏导,令偏导等于0时获得最小误差的位置估计,如式(14)~式(16)所示。

$$\min : Q = \sum_{i=1}^N ((M_{(2i-1,1)}x_U + M_{(2i-1,2)}y_U + M_{(2i-1,3)}z_U - b_{(2i-1)})^2 + (M_{(2i,1)}x_U + M_{(2i,2)}y_U + M_{(2i,3)}z_U - b_{2i})^2) \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q}{\partial x_U} &= 2 \sum_{i=1}^N (M_{(2i-1,1)}M_{(2i-1,1)}x_U + M_{(2i-1,1)}M_{(2i-1,2)}y_U + \\ &M_{(2i-1,1)}M_{(2i-1,3)}z_U - M_{(2i-1,1)}b_{(2i-1)}) + \\ &2 \sum_{i=1}^N (M_{(2i,1)}M_{(2i,1)}x_U + M_{(2i,1)}M_{(2i,2)}y_U + \\ &M_{(2i,1)}M_{(2i,3)}z_U - M_{(2i,1)}b_{2i}) = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q}{\partial y_U} &= 2 \sum_{i=1}^N (M_{(2i-1,2)}M_{(2i-1,1)}x_U + M_{(2i-1,2)}M_{(2i-1,2)}y_U + \\ &M_{(2i-1,2)}M_{(2i-1,3)}z_U - M_{(2i-1,2)}b_{(2i-1)}) + \\ &2 \sum_{i=1}^N (M_{(2i,2)}M_{(2i,1)}x_U + M_{(2i,2)}M_{(2i,2)}y_U + \\ &M_{(2i,2)}M_{(2i,3)}z_U - M_{(2i,2)}b_{2i}) = 0 \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q}{\partial z_U} &= 2 \sum_{i=1}^N (M_{(2i-1,3)}M_{(2i-1,1)}x_U + M_{(2i-1,3)}M_{(2i-1,2)}y_U + \\ &M_{(2i-1,3)}M_{(2i-1,3)}z_U - M_{(2i-1,3)}b_{(2i-1)}) + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &2 \sum_{i=1}^N (M_{(2i,3)}M_{(2i,1)}x_U + M_{(2i,3)}M_{(2i,2)}y_U + \\ &M_{(2i,3)}M_{(2i,3)}z_U - M_{(2i,3)}b_{2i}) = 0 \end{aligned} \quad (16)$$

其中, $i=1,2,\dots,N$, 化简式(14)~式(16)得式(17)。

$$\begin{cases} A_1x_U + A_2y_U + A_3z_U = A_4 \\ B_1x_U + B_2y_U + B_3z_U = B_4 \\ C_1x_U + C_2y_U + C_3z_U = C_4 \end{cases} \quad (17)$$

其中, 变量 $A_1, A_2, A_3, A_4, B_1, B_2, B_3, B_4, C_1, C_2, C_3, C_4$ 见 4.1 节的式(9)。

最终求解方程组可得式(18), 因式分解式(17)后化简即可得到 4.1 节的式(8)。

$$\begin{cases} x_U = \frac{(A_4C_3 - A_3C_4)(B_2C_3 - B_3C_2) - (B_4C_3 - B_3C_4)(A_2C_3 - A_3C_2)}{(A_1C_3 - A_3C_1)(B_2C_3 - B_3C_2) - (B_1C_3 - B_3C_1)(A_2C_3 - A_3C_2)} \\ y_U = \frac{(A_4C_3 - A_3C_4)(B_1C_3 - B_3C_1) - (B_4C_3 - B_3C_4)(A_1C_3 - A_3C_1)}{(A_2C_3 - A_3C_2)(B_1C_3 - B_3C_1) - (B_2C_3 - B_3C_2)(A_1C_3 - A_3C_1)} \\ z_U = \frac{(C_2B_1 - C_1B_2)(A_4B_2 - A_2B_4) - (A_1B_2 - A_2B_1)(B_4C_2 - B_2C_4)}{(C_2B_1 - C_1B_2)(A_3B_2 - A_2B_3) - (A_1B_2 - A_2B_1)(B_3C_2 - B_2C_3)} \end{cases} \quad (18)$$

参考文献:

- [1] SAVAZZI S, NICOLI M, CARMINATI F. A Bayesian approach to device-free localization: modeling and experimental assessment[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2014, 8(1): 16-29.
- [2] FIORE M, ETTORE C C, CHIASSERINI C. Discovery and verification of neighbor positions in mobile ad hoc networks[J]. IEEE Trans on Mobile Computing, 2013, 12(2): 289-303.
- [3] 肖竹, 王东, 李仁发等. 物联网定位与位置感知研究[J]. 中国科学: 信息科学, 2013, 43(10): 1265-1287.
- [4] XIAO Z, WANG D, LI R F, *et al.* Localization and nodes location-aware in internet of things: a survey[J]. Science China: Information Sciences, 2013, 43(10): 1265-1287.
- [5] ZHAO J Z, XI W, HE Y. Localization of wireless sensor networks in the wild: pursuit of ranging quality[J]. IEEE/ACM Trans on Networking, 2013, 21(1): 311-323.
- [6] SHEN J, MOLISCH A F. Indirect path detection based on wireless propagation measurements[J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2012, 11(12): 4482-4493.
- [7] YU K G, DUTKIEWICZ E. Geometry and motion-based positioning algorithms for mobile tracking in NLOS environments [J]. IEEE Trans on Mobile Computing, 2012, 11(2): 254-263.
- [8] HE J, GENG Y S, PAHLAVAN K. Modeling indoor TOA ranging error for body mounted sensors[A]. IEEE 23rd International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications, PIMRC'12[C]. 2012. 682-686.
- [9] ZHAO Y, WU H Y, JIN M. Localization in 3D surface sensor networks: challenges and solutions[A]. Proc of 2012 INFOCOM[C]. 2012.55-63.
- [10] MONTORSI F, PANCALDI F, VITETTA G M. Statistical characterization and mitigation of NLOS errors in UWB localization systems[A]. Proc of International Conference on Ultra-Wideband,

ICUWB'11[C]. Bologna, Italy, 2011. 86-90.

- [10] MARANÒ S, GIFFORD W M, WYMEERSCH H. NLOS identification and mitigation for localization based on UWB experimental data [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2010, 28(7): 1026-1035.
- [11] TSENG P H, DING Z, FENG K T. Cooperative self-navigation in a mixed LOS and NLOS environment [J]. *IEEE Trans on Mobile Computing*, 2014, 13(2): 350-363.
- [12] 蒙静, 张钦宇, 张乃通等. IR-UWB 定位系统距离误差建模及性能研究[J]. *通信学报*, 2011, 32(6): 10-16.
MENG J, ZHANG Q Y, ZHANG N T, *et al.* Modeling the distance error and performance analysis in IR-UWB positioning system[J]. *Journal on Communications*, 2011, 32(6): 10-16.
- [13] CHEN H Y, WANG G, WANG Z Z. Non-line-of-sight node localization based on semi-definite programming in wireless sensor networks[J]. *IEEE Trans on Wireless Communications*, 2012, 11(1): 108-116.
- [14] 崔玮, 吴成东, 张云洲等. 基于高斯混合模型的非视距定位算法[J]. *通信学报*, 2014, 35(1): 99-106.
CUI W, WU C D, ZHANG Y Z, *et al.* GMM-based localization algorithm under NLOS conditions[J]. *Journal on Communications*, 2014, 35(1): 99-106.
- [15] WYMEERSCH H, MARANÒ S, GIFFORD W M. A machine learning approach to ranging error mitigation for UWB localization[J]. *IEEE Trans on Communications*, 2012, 60(6): 1719-1728.
- [16] HUANG J Y, WAN Q. Analysis of TDOA and TDOA/SS based geolocation techniques in a non-line-of-sight environment[J]. *Journal of Communications and Network*, 2012, 14(5): 533-539.
- [17] TSALOLIKHIN E, BILIK I, BLAUNSTEIN N. A single-base-station localization approach using a statistical model of the NLOS propagation conditions in urban terrain[J]. *IEEE Trans on Vehicular Technology*, 2011, 60(3): 1124-1137.
- [18] 张浩, 刘兴, GULLIVER T A 等. 基于单基站天线阵列的超宽带定位 AOA 估计方法[J]. *电子与信息学报*, 2013, 35(8): 2024-2028.
ZHANG H, LIU X, GULLIVER T A, *et al.* AOA estimation for UWB positioning using a mono-station antenna array[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(8): 2024-2028.
- [19] WANG W J, YAO B B, YIN Q Y. AOD estimation in WSN localization system with synthetic aperture technique[J]. *Science China-Information Sciences*, 2012, 55(10): 2216-2225.
- [20] STEVEN M K. 统计信号处理基础——估计与检测理论[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011.
STEVEN M K. *Fundamentals of Statistical Signal Processing: Estimation Theory*[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011.

作者简介:



肖竹(1981-), 男, 湖南涟源人, 博士, 湖南大学讲师, 主要研究方向为下一代无线通信网、异构网络规划与优化、测距与定位导航技术。



陈杰(1988-), 男, 湖南娄底人, 湖南大学硕士生, 主要研究方向为测距与定位导航技术。



王东(1964-), 男, 湖南长沙人, 博士, 湖南大学教授、博士生导师, 主要研究方向为移动计算、VANET 和无线通信。



李晓鸿(1973-), 男, 湖南长沙人, 博士, 湖南大学讲师, 主要研究方向为无线网络和拓扑管理。



李仁发(1957-), 男, 湖南郴州人, 博士, 湖南大学教授、博士生导师, 主要研究方向为嵌入式计算、无线网络、网络与数字媒体。