

文章编号: 0258-2724(2018)01-0182-07 DOI: 10.3969/j.issn.0258-2724.2018.01.022

一种新的基于 LPMD 的散射路径识别算法

邓平, 芮洋, 邓水发

(西南交通大学信息科学与技术学院, 四川 成都 610097)

摘要: NLOS (non-line-of-sight) 非视距误差是地面无线定位的主要误差来源. 为了从 NLOS 散射信号中识别出单次散射路径和多次散射路径, 提出了一种新的基于 LPMD (line-of-possible-mobile-device) 目标可能位置线的识别算法. 该算法以所有 LPMD 线的交点来计算初步参考点位置, 并通过距离初步参考点较远的一部分交点对剩余较近的交点做负期望补偿, 以修正参考点的位置, 同时使用参考点到各 LPMD 线的直线距离来构造散射路径类型判决表达式, 进行单/多次散射路径判决. 在不同的仿真参数条件下, 分别对普通场景和特殊场景进行了散射路径识别仿真实验, 结果表明, 当侦测站和目标点之间的距离达到 4 km 时, 本文算法的虚警和漏警概率分别只有 3% 和 9%, 比原有基于 LPMD 算法的分别降低了 21% 和 8%.

关键词: 非视距; 散射路径识别; 单次散射; 多次散射; 目标可能位置线

中图分类号: TN915.9 **文献标志码:** A

Novel Scattering Path Recognition Algorithm Based on LPMD

DENG Ping, RUI Yang, DENG Shuifa

(School of Information Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610097, China)

Abstract: Non-line-of-sight (NLOS) error is the major source of error in ground wireless localization. In order to recognize single-bound scattering path and multiple-bound scattering paths from all the NLOS scattering paths, we propose a novel recognition algorithm based on line-of-possible-mobile-device (LPMD). This algorithm first utilizes the cross points of all the LPMDs to calculate the coordinate of a reference point. The algorithm then uses part of the cross points far away from the reference point to obtain minus expectation compensation to revise the location of reference point, builds the judgement formula of scatter path type based on the distance between each LPMD and the reference point to make single/multiple bound path judgement. Under normal and special scenery, the simulation tests of scatter path judgement are performed under different parameter conditions; the simulation results show when the distance between the target and the detecting station reaches 4 km. A false alarm probability and a false dismissal probability of the proposed algorithm can be limited to 3% and 9%, respectively. Further, these probabilities can be decreased by about 21% and 8%, respectively, when compared with the original LPMD algorithm.

Key words: non-line-of-sight; scattering path recognition; single-bound scattering; multiple-bound scattering; line-of-possible-mobile-device (LPMD)

在地面无线定位中, 因为无线信号传输的固有特性, 诸如多径传输、路径损耗、信号间干扰、阴影

衰落和非视距传输等因素的影响, 都容易导致定位结果偏离真实值. 其中, 非视距传输是定位误差的

收稿日期: 2016-01-27

作者简介: 邓平(1964—), 男, 教授, 博士, 研究方向为无线网络定位技术、统计信号处理、无线传感网络等, E-mail: pdeng@swjtu.edu.cn

引文格式: 邓平, 芮洋, 邓水发. 一种新的基于 LPMD 的散射路径识别算法[J]. 西南交通大学学报, 2018, 53(1): 182-188.

邓平, RUI Yang, DENG Shuifa. Novel scattering path recognition algorithm based on LPMD[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2018, 53(1): 182-188.

主要来源^[1-2]. 为了在这样的环境中对被测目标进行精确定位,人们研究了很多非视距环境下的定位算法.

其中,基于散射体信息的定位算法,根据研究的方式和方法,主要分为两类:一类就是根据散射体建模,并根据接收信号的统计特征来建立一个数学模型,通过将接收到的信号带入数学模型中进行定位^[3-6];另一类就是根据散射体的几何位置来定位的方法,由于其思路在于把 NLOS (non-line-of-sight) 误差转化为确定性的物理模型因素,使定位精度主要取决于定位参数的测量精度,和 NLOS 引起的参数偏差无关,这为实现高精度定位提供了可能,近年来受到了大量的研究和关注^[7-12].

根据统计特征来建模的方法,将所有的视距信号和非视距信号都作为统计信号来处理,并不单独考虑散射信号是单次散射还是多次散射. 以上利用散射体的几何位置信息来定位的算法中,绝大部分都没有考虑多次散射路径信号,或者直接假设所有的散射信号都是单次散射路径信号^[13-14],而在非视距干扰严重的环境下,多次散射路径信号的增加会大大降低这些算法的性能.

为了解决散射路径识别的问题,文献[7]提出一种基于 LPMD (line-of-possible-mobile-device) 的算法来识别散射信号中的单次散射信号和多次散射信号. 该方法先计算各 LPMD 的到达时间 (time-of-arrival, TOA) 权值,并通过设定一个门限来筛选一部分权值较小的 LPMD,再计算筛选出来的这部分 LPMD 的几何中心作为参考点的坐标,然后以参考点到各 LPMD 中点的距离来构造判决计算式. 该方法除了最后的散射路径判决外,还多了一次 LPMD 的 TOA 权值判决,不仅为参考点的计算带来误差,还没能充分利用所有 LPMD 的几何信息. 而且,直接以各 LPMD 的几何中心作为参考点的坐标,会使参考点到真实目标之间存在较大的偏差,尤其是当被测目标处于侦测站围成的区域外侧时,这个距离偏差会更大,从而严重影响到最后路径判决的准确度. 例如,在边境线、特殊山谷环境和战场环境中,一方面是侦测站选址的限制,一方面是被测目标本身的特性,决定了被测目标基本只会在侦测站围成的区域外侧活动,而这种特殊场景也很少有文献考虑,但其本身依旧具有很大的研究价值,且在近些年来,也鲜有基于 LPMD 的散射路径识别这类算法的进一步研究.

为此,本文提出了一种新的基于 LPMD 的识别

算法,考虑到普通环境和特殊环境下不同的 LPMD 的分布特点,以所有 LPMD 的交点来计算初步参考点位置,并通过对所有交点中,距离初步参考点较远的一部分交点,对剩余的较近的点做负期望补偿来修正参考点的位置. 同时使用参考点到各 LPMD 的直线距离来构造判决计算式. 相比文献[7]算法大大优化了参考点的计算准确度,减少了额外的判决次数,无论当被测目标处于侦测站围成区域的内侧或外侧时,都有更优良的散射路径识别性能.

1 LPMD 概念

如图1所示,图中: B 是侦测站; D_m 是被测目标; S 是侦测站 B 接收到的散射信号路径经过的散射点; φ 是信号出射角; θ 是信号到达角.

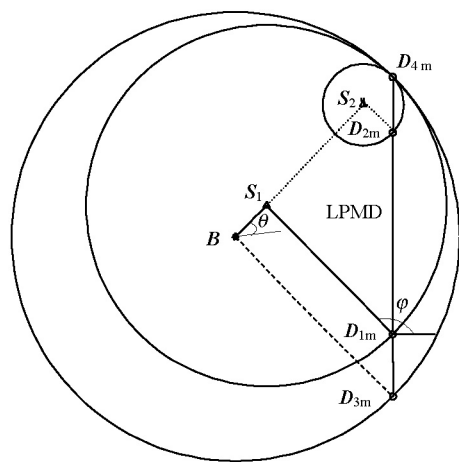


图1 LPMD 示意图
Fig.1 Sketch map for LPMD

侦测站 B 在测得接收信号的 TOA 值和 AOA (angle-of-arrival) 值后,以 TOA 测量值的距离为半径画一个大圆,如果目标 D_m 到侦测站之间是视距传播,则 D_m 应该在大圆上的一点,此时信号出射角 φ 和到达角 θ 应该互补;当然,在非视距环境下,目标到侦测站之间存在 NLOS 传播,信号经过 S 的散射之后再到达 B ,此时,由于信号经过散射的原因,信号出射角 φ 和到达角 θ 一般不满足互补.

在 NLOS 传播情况下,散射体的位置应该在以侦测站 B 为起点,以信号到达角 θ 为幅角,幅长小于等于 TOA 距离的一条线段上;而被测目标 D_m 在以散射体为圆心的圆上,再加上信号出射角的约束,就可以得到相应的被测目标 D_m 的位置.

这里讨论的散射信号是单次散射的情况. 由图1可以看出,在 B 看来, S 的位置是不固定的,有可能在信号到达角 θ 这条线段上的任一点,从而

D_m 的位置也是不固定的,但是 B 到 S 的距离 $d_{B,S}$,再加上 S 到 D_m 的距离 d_{S,D_m} ,这个总距离 d_{TOA} 是固定的. 根据式(1)的几何关系

$$\left. \begin{aligned} d_{B,S} + d_{S,D_m} &= d_{TOA}, \\ S &= B + \overline{d_{B,S}}, \\ D_m &= S + \overline{d_{S,D_m}}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

可以在图 1 中得到 D_m 所有可能的位置,从而可以发现 D_m 可能所处的位置是一条线段,这条线段称为 D_m 的可能位置线,即图 1 中的 LPMD.

2 基于 LPMD 的识别算法

以上是假设侦测站接收到的信号是单次散射信号,如果考虑到接收到的散射信号中含多次散射信号,由于多次散射信号的 TOA 值更大,所以其对应的 LPMD 距离真实目标点更远,从而和单次散射信号的 LPMD 区分开,如图 2 所示.

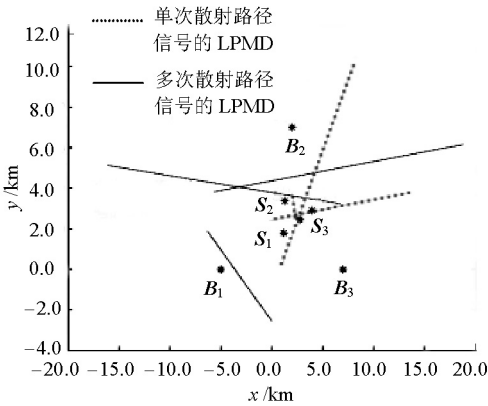


图 2 多侦测站 LPMD 示意
Fig. 2 Sketch map for LPMDs in multiple stations

图 2 中,假设有 3 个侦测站,真实目标点的坐标为 $(2.5, 2.5)$ km,在真实目标点周围按照圆环散射模型^[15],半径为 1.0 km,随机设了 3 个散射点,即图 2 中的 S_1, S_2, S_3 ,分布在真实目标点的周围,且被测目标的位置在 3 个侦测站所围成的区域中. 目标发射出的信号,一部分经过 3 个散射体单次散射后被各个侦测站接收,形成单次散射路径;另一部分通过 2 个或 3 个散射体的连续多次散射后再被各个侦测站接收,形成多次散射路径. 然后依次对各个侦测站按第 1 节中描述的方法,绘制其对应的 LPMD. 图 2 中只画出了部分的单次散射信号的 LPMD 和部分的多次散射信号的 LPMD. 从图 2 可以看出,单次散射路径信号的 LPMD 相交于真实目标点附近.

对于散射路径的识别,文献[7]中算法分为

2 个步骤:

步骤 1 首先根据各侦测站接收到的散射信号,在坐标轴上得到全部散射信号对应的 LPMD 图,然后计算其中每条 LPMD 线的权重,用以计算参考点 C ,TOA 距离越大的权重越小,TOA 距离越小的权重越大,计算过程为

$$\omega_{j,m} = \frac{1}{NM} \frac{\sum_{j=1}^N \sum_{m=1}^M t_{j,m}}{0.5t_{j,m}}, \quad (2)$$

式中: $\omega_{j,m}$ 为该路径信号对应的权值; M 为第 j 个侦测站的散射信号总数; N 为侦测站总数; $t_{j,m}$ 为第 j 个侦测站接收到的第 m 个散射信号的 TOA 测量值.

$$w_{j,m} = \frac{\omega_{j,m}}{\sum_{j=1}^N \sum_{m=1}^M \omega_{j,m}}, \quad (3)$$

式中: $w_{j,m}$ 是第 j 个侦测站接收到的第 m 个散射信号对应的权重.

然后设置一个权重门限 w ,文献[7]中给出的建议值为 0.1,只有大于这个门限的 LPMD 才会被用来计算参考点 C ,如式(4).

$$C = E(L_s) = \frac{1}{NM} \sum_{j=1}^N \sum_{m=1}^M M_{\text{MidPoint}}, \quad w_{j,m} > w, \quad (4)$$

式中: M_{MidPoint} 为每条 LPMD 的中点坐标; L_s 为 LPMD 总数.

步骤 2 得到 C 的坐标之后,再计算 M_{MidPoint} 到 C 的距离权重,文献[7]中以各 LPMD 的中点到 C 的距离来构造判决计算式,如式(5).

$$\left. \begin{aligned} \delta_{j,m} &= \|M_{\text{MidPoint}} - C\|, \\ d_{j,m} &= \frac{\delta_{j,m}}{\sum_{j=1}^N \sum_{m=1}^M \delta_{j,m}}, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中: $\delta_{j,m}$ 为第 j 个侦测站的第 m 条 LPMD 到 C 的距离权值; $d_{j,m}$ 为其对应的距离权重.

这里同样设置一个权重门限 d ,文献[7]中给出的推荐值是 0.2,大于这个门限的 LPMD 对应的信号路径被判定为多次散射路径,而小于这个门限的 LPMD 对应的信号路径被判定为单次散射路径,即

$$\left. \begin{aligned} \text{多次散射路径, } d_{j,m} &> d; \\ \text{单次散射路径, } d_{j,m} &< d. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

图 2 中, C 即是按式(4)计算的参考点,通过观察可以看出, C 到单次散射路径信号的 LPMD 中

点的距离相比到多次散射路径信号的 LPMD 的距离要短,从而实现对散射路径的识别。

3 本文基于 LPMD 的识别算法

文献[7]的算法中,总共进行了 2 次门限判决,而每次判决势必都有误差存在;其次,按文献[7]算法计算的 C ,其实是各 LPMD 的几何中心,其位置与实际目标点差距较大,会给算法的识别性能带来不利影响;文献[7]算法是针对目标处于侦测站所围成的区域内侧这种情形提出的,并没有考虑目标处于区域外侧的情形。本文中考虑两种情况,(1)普通场景:被测目标处于侦测站围成的区域内侧;(2)特殊场景:被测目标处于侦测站围成的区域外侧。

图 3 和图 4 分别模拟了 50 次文献[7]算法在普通和特殊场景下计算的 C 的位置。通过对比图 3

和图 4 可以看出,文献[7]算法在普通场景下, C 的位置相对集中在真实目标点周围;而在特殊场景下, C 相对真实目标点的偏差,要比普通场景下大很多。

本文在算法设计之初就同时考虑了普通和特殊场景下各自的 LPMD 图的特点,采用了和文献[7]算法完全不同的 C 的计算方式,整个算法分为 3 步:

- 第 1 步 计算所有 LPMD 的交点 $C_{\text{crosspoint}}$;
- 第 2 步 计算初步参考点并通过负期望补偿来修正;
- 第 3 步 通过参考点到 LPMD 的直线距离来做判决。

首先在计算参考点之前,找出所有 LPMD 的交点,如图 5 所示为是单次散射路径信号仿真中的 LPMD 及其所有交点的计算结果。其中线段为各 LPMD,共有 49 个交点;目标点位置为 (2.5,6.0) km,可以看到,大多数的交点都落在了目标点的附近,只有小部分的交点偏离了很远。这是因为,理想情况下,没有误差等因素影响,单次散射路径信号的 LPMD 的交点就是目标点的位置,而多次散射路径信号的 LPMD 会产生离目标点很远的交点。

然后,计算 C 时,不再使用所有 LPMD 的两头端点来计算,而是使用所有 LPMD 的交点来计算,如式(7)。

$$C = E(C_{\text{crosspoint}}),$$

将 $C_{\text{crosspoint}}$ 平均之后,得到初步的 C 的坐标。

(7)

图 3 普通场景下文献[7]算法的参考点 C 位置示意
Fig. 3 Sketch map for refer-point C of literature[7] under normal scene

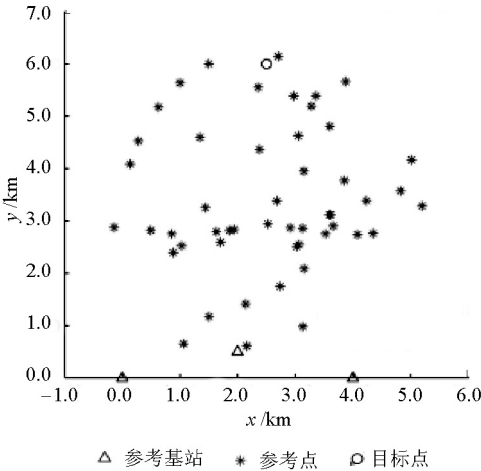


图 4 特殊场景下文献[7]算法的参考点 C 位置示意
Fig. 4 Sketch map for refer-point C of literature[7] under special scene

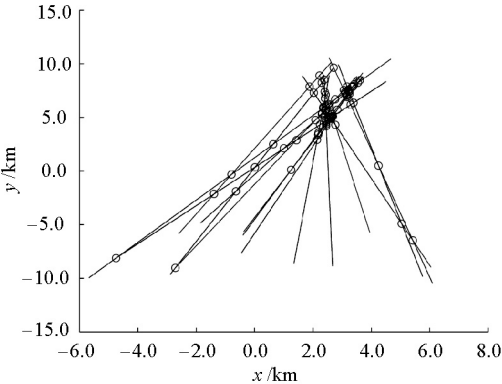


图 5 特殊目标环境下的 LPMD 交点计算示意
Fig. 5 Sketch map for calculating the cross-points of LPMDs under special scene

由以上分析可知,单次散射路径信号 LPMD 产生的交点都离目标点相对较近,而多次散射路径信号的 LPMD 会产生大量的远点,通过取平均来计算参考点时,这些远点把参考点 C 往其方向拉,从而

使计算得出的参考点 C 偏离目标点较远. 尤其是在特殊场景下, 如图 5 所示, LPMD 的分布模式大致为扇形放射状, 且扇形的头端离目标点很近, 但是扇尾部分离目标点很远, 这部分的交点在直接做平均的时候, 把 C 从靠近目标点的位置附近拖向了远点方向. 所以在计算出初步的参考点之后, 应再通过所有交点中的一部分远点对 C 的位置做负期望补偿, 从而对 C 的位置做修正.

先求出所有交点到修正前 C 的距离, 然后降序排列, 取出前 F_{fixnum} 个距离最远的点作为优化点, 对剩下的 $P_{\text{pointnum}} - F_{\text{fixnum}}$ 个点做负期望补偿. 通过式(8)得到修正后的参考点 C_{crt} .

$$C_{\text{crt}} = C - \frac{\sum_{i=1}^{F_{\text{fixnum}}} (C_{\text{crosspoint}} - C)}{P_{\text{pointnum}} - F_{\text{fixnum}}} A, \tag{8}$$

式中: P_{pointnum} 为计算得到的所有交点的个数; F_{fixnum} 占 P_{pointnum} 的比例和具体环境的非视距干扰程度有关, 干扰越大, 多次散射路径信号越多, 则 F_{fixnum} 需要适当增大, 经过仿真测试, 建议取值为 P_{pointnum} 的 1/4, 后文的仿真对取值选择进行了说明; A 为修正系数矩阵,

$$A = \begin{bmatrix} A_x & 0 \\ 0 & A_y \end{bmatrix}, \tag{9}$$

式中: A_x 和 A_y 分别为横坐标和纵坐标修正系数, 经过仿真测试, 建议取值为 $A_x = A_y = 1.1$.

得到 C_{crt} 之后, 计算 C_{crt} 到每条 LPMD 的距离权重

$$\left. \begin{aligned} \delta_m &= \|C_{\text{crt}} - L_m\|, \\ d_m &= \frac{\delta_m}{\sum_{i=1}^M \delta_i} \end{aligned} \right\} \tag{10}$$

式中: δ_m 为以第 m 条 LPMD 到 C_{crt} 的距离权值; d_m 为其对应的距离权重; L_m 为第 m 条 LPMD.

然后设置一个权重门限 d , 大于该门限的判决为多次散射路径, 小于该门限的判决为单次散射路径, 即

$$\left. \begin{aligned} \text{多次散射路径, } d_m &> d; \\ \text{单次散射路径, } d_m &< d. \end{aligned} \right\} \tag{11}$$

经过仿真测试, 推荐 $d = 0.025$.

上述各参数取值虽然是经过仿真给出的建议值, 但是相应的值都是在经过对各种复杂的、具有代表性的非视距情景仿真之后, 综合各种情景下算法性能得到的具有普适性的值.

在算法复杂度上, 相比文献[7]的算法, 在得

到各侦测站的 LPMD 之后, 本文算法是先计算所有的 LPMD 的交点, 而文献[7]算法是先计算各 LPMD 的 TOA 权重, 在路径数比较多的情况下, 本文算法计算交点的计算复杂度会略高一些, 在路径数比较少的情况下, 两者计算复杂度相差不大.

4 仿真结果与分析

本文采用圆环散射模型来模拟散射体, 散射体个数为 3 个, 随机按散射半径分布在目标点周围; TOA 误差为符合 $N(0, 1)$ 分布的加性高斯噪声, AOA 误差为符合 $N(0, \pi/180)$ 分布的加性高斯噪声, 侦测站为 3 个, 单次散射路径为信号从目标点经过 1 个散射点散射之后分别到达 3 个侦测站, 共有 9 条单次散射路径; 多次散射路径为信号从目标点经过 3 个散射点中的随机 2 个和 3 个点连续散射之后到达侦测站, 每个侦测站接收 2 条, 共 6 条多次散射路径, 总共 15 条散射路径, 且不考虑 LOS 路径, 每次仿真独立运行 1 000 次. 分别对普通场景和特殊场景进行仿真, 将本文提出的算法与文献[7]中的算法进行比较, 并通过仿真对本文算法中的参数选取进行说明.

仿真 1 普通场景下, 目标点的位置坐标为 (2.5, 2.5) km, 侦测站的位置坐标分别为 (0, 0)、(2.0, 5.0)、(5.0, 0) km. 散射模型半径为 0.7 km.

通过表 1 可以得出, 普通场景下, 本文算法计算的 C 相对目标点的偏差和文献[7]算法相比, 有明显的改进.

表 1 普通场景下两种算法的参考点平均偏差
Tab. 1 Average deviation between refer-point and real target of both algorithms under normal scene

算法	参考点平均偏差 /m
文献[7]	726.3
本文	74.7

图 6 中显示了不同散射半径时, 两种算法的识别性能对比, 可以看出, 本文算法不管是漏警概率还是虚警概率, 都明显好于文献[7]算法. 随着散射半径的增加, 两种算法的识别性能提高, 这是因为散射半径越大, 圆环模型中的 3 个散射体相互之间的距离也就更远, 从而单次散射信号的 TOA 值和多次散射信号相比, 会有更明显的差异, 从而更容易识别.

仿真 2 特殊场景下, 目标点位置为坐标 (2.5, 6.0) km, 侦测站的位置为 (0, 0)、(2.0, 0.5)、(4.0, 0) km. 散射模型半径为 1.5 km.

通过表 2 和表 1 的比较可以得出,特殊场景下文献[7]算法计算得出的参考点位置偏离真实点很大,比普通场景下的偏差更明显,和图 4 得到的结果基本一致.而本文算法的偏差只是文献[7]算法的 6.67%.

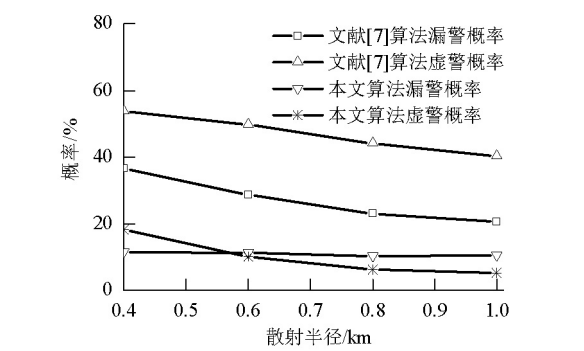


图 6 普通场景下不同散射半径时两种算法的识别性能
Fig. 6 Recognition performance of both algorithms with different scatter radius in normal scenes

表 2 特殊场景下两种算法的参考点平均偏差
Tab. 2 Average deviation between refer-point and real target of both algorithms under special scene

算法	参考点平均偏差 /m
文献[7]	2741.3
本文	191.5

通过图 7 和图 6 比较可以得出,随着散射半径的增加,特殊场景也和普通场景一样,两种算法的识别性能都会增加.同时,本文算法的识别性能依旧要明显好于文献[7]算法的.

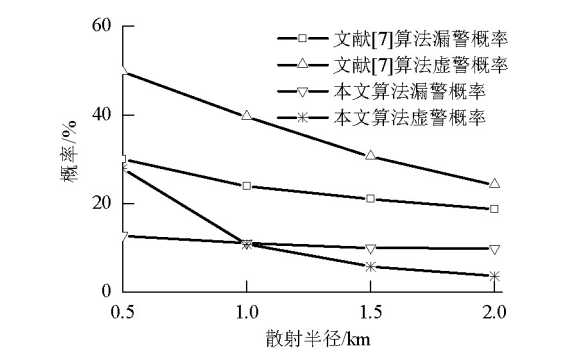


图 7 特殊场景下不同散射半径时两种算法的识别性能
Fig. 7 Recognition performance of both algorithms with different scatter radius in special scenes

在图 8 中,保持散射半径为 1.5 km 不变,改变目标点的 y 轴坐标,相当于改变了侦测站和目标点之间的距离.从图 8 中可以看出,当距离增加时,两种算法的识别性能都变差,但是即使侦测站和目标点之间的距离到了 8.0 km,本文算法依旧可以把漏警和虚警概率保持在 10% 以内.

仿真 3 对本文算法中参数 F_{fixnum} 的占比情况进行仿真测试,普通场景与仿真 1 中的场景设置相同,特殊场景与仿真 2 中的设置相同.为了说明 F_{fixnum} 占比取值是如何选出的,先设定其他参数变量:补偿系数 A_x 和 A_y 设置为 1,门限 d 参考文献[7]中的取值为 0.2,改变 F_{fixnum} 占 $P_{pointnum}$ 的比例,每次仿真独立运行 1 000 次,分析算法在不同占比情况下的识别性能.

图 9 所示仿真结果显示了不同 F_{fixnum} 占 $P_{pointnum}$ 比例情况下,本文算法的识别性能.从图 9 中可以看出,在两种场景下,当 F_{fixnum} 占比数为 0.25 时本文算法具有最小的漏警概率,当比例取 0.25 时对应最好的识别性能,故上述研究中选择 0.25 作为 F_{fixnum} 占 $P_{pointnum}$ 的比值.

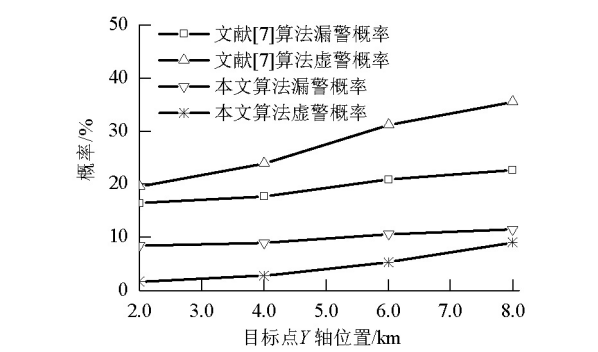


图 8 特殊场景下不同目标点距离时两种算法的识别性能
Fig. 8 Recognition performance of both algorithms for different target point distance in special scene

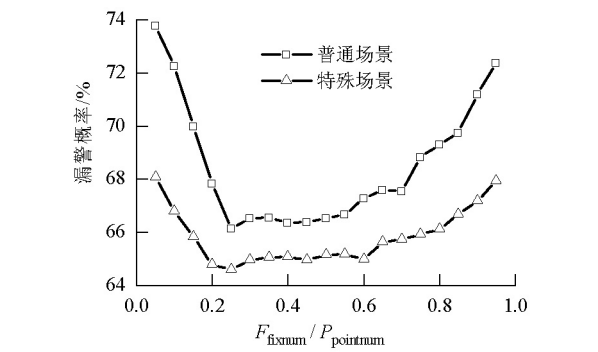


图 9 两种场景下不同的识别性能
Fig. 9 Recognition performance of the new algorithm with different percent of in two scenes

5 结 论

本文提出了一种新的基于 LPMD 的散射路径识别算法,以所有 LPMD 交点为基础来计算参考点坐标,并通过负期望补偿来修正参考点的精度,总共只有一次判决,相比文献[7]算法减少了 1 次额外判决,并且大幅优化了参考点的准确性,不论被

测目标处于侦测站围成的区域内侧或外侧时,都能有很好的识别准确度,兼顾普通场景和特殊场景下的识别性能,增加了算法的普适性,在算法的计算复杂度上并没有明显的增加,仿真结果也验证了该方法针对 NLOS 环境单次、多次散射路径识别问题是有效的。

参考文献:

- [1] JATIVA E R, SANCHEZ D, VIDAL J. NLOS mitigation based on TOA for mobile subscriber positioning systems by weighting measures and geometrical restrictions[C]// 2015 Asia-Pacific Conference on Computer Aided System Engineering (APCASE). [S. l.]: IEEE, 2015: 325-330.
- [2] SILVENTOINEN M I, RANTALAINEN T. Mobile station emergency locating in GSM[C]// IEEE International Conference on Personal Wireless Communications. [S. l.]: IEEE Xplore, 1996: 232-238.
- [3] 周非,陈庭盈,范馨月. 基于 AOA-TOA 重构的单站定位算法[J]. 重庆邮电大学学报,2012,24(2): 222-226.
ZHOU Fei, CHEN Tingying, FAN Xinyue. Algorithm of single station location based on AOA-TOA reconstruction[J]. Journal of Chongqing University of Posts & Telecommunications, 2012, 24(2): 222-226.
- [4] TIAN Z, YAO L, ZHOU M, et al. Scattering model based hybrid TOA/AOA/AOD localization in NLOS environment[C]// The Proceedings of the Second International Conference on Communications, Signal Processing, and Systems. [S. l.]: Springer International Publishing, 2014: 893-901.
- [5] LIBERTI J C, RAPPAPORT T S. A geometrically based model for line-of-sight multipath radio channels[C]// Vehicular Technology Conference on Mobile Technology for the Human Race. [S. l.]: IEEE, 1996: 844-848.
- [6] SIMSIM M T, KHAN N M, RAMER R, et al. Time of arrival statistics in cellular environments[C]// Proceedings of the 64th IEEE Vehicular Technology Conference. [S. l.]: IEEE, 2006: 2666-2670.
- [7] SEOW C K, TAN S Y. Non-line-of-sight localization in multipath environments[J]. IEEE Transactions on Moblie Computing, 2008, 7(5): 647-660.
- [8] 杨天池,程娟,邵奇峰,等. 单站定位中的散射体位置

及散射距离的估计方法:合成运动的扩展卡尔曼估计[J]. 电子学报,2014,42(4): 730-735.

- YANF Tianchi, CHENG Juan, SHAO Qifeng, et al. The estimation of the scatterer position and scattering distance in the single station location: the EKF estimation based on synthetic motion[J]. Acta Electronica Sinica, 2014, 42(4): 730-735.
- [9] ZHOU F, FAN X, CHEN T Y. Improved positioning algorithm based on linear constraints on scatterers[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2013, 2013(1): 1-10.
- [10] CHEN S W, SEOW C K, TAN S Y. Virtual reference device-based NLOS localization in multipath environment[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2014, 13(13): 1409-1412.
- [11] ZHU X, SHI M, ZHANG J, et al. A scattering model based non-line-of-sight error mitigating algorithm via distributed multi-antenna[C]// IEEE 18th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. [S. l.]: IEEE Xplore, 2007: 1-5.
- [12] AL-JAZZAR S, GHOGHO M, MCLERNON D. A joint TOA/AOA constrained minimization method for locating wireless devices in non-line-of-sight environment[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(1): 468-472.
- [13] 肖竹,陈杰,王东,等. 严重遮挡非视距环境下的三维定位方法[J]. 通信学报,2015,36(8): 68-75.
XIAO Zhu, CHEN Jie, WANG Dong, et al. Three-dimensional localization under severely obstructed NLOS environment[J]. Journal on Communications, 2015, 36(8): 68-75.
- [14] MIAO H, YU K, JUNTITI M J. Positioning for NLOS propagation: algorithm derivations and cramer-rao bounds[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2007, 56(5): 2568-2580.
- [15] OLENKO A Y, WONG K T, NG H O. Analytically derived TOA-DOA statistics of uplink/downlink wireless multipaths arisen from scatterers on a hollow-disc around the mobile[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2003, 2(1): 345-348.

(编辑:唐 晴)