

NLOS 环境下基于信号检测的单次与二次散射路径识别

谢少杰 邓 平

(西南交通大学信息编码与传输重点实验室, 四川成都 611700)

摘 要: 针对 NLOS (Non-Line-of-Sight) 传播环境中单次与多次散射路径的识别问题, 本文基于单次散射圆环模型建立了一种二次散射圆环模型, 对该模型的统计特征进行了分析。同时, 基于信号统计检测理论建立了一种单次与二次散射路径检测模型, 然后根据是否已知先验概率两种情况, 分别采用广义似然比和奈曼皮尔逊准则来检测识别两种散射路径。仿真结果表明: 本文提出的检测识别方法在 NLOS 环境下能有效识别两种散射路径, 相对于 LPMD (Line of Possible Mobile Device) 算法具有更高的识别率以及更小的虚警概率和漏警概率, 且时间开销小, 具有一定的应用价值。

关键词: 二次散射; 散射模型; non-line-of-sight; 信号检测; 路径识别

中图分类号: TN911.7 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16798/j.issn.1003-0530.2020.05.012

引用格式: 谢少杰, 邓平. NLOS 环境下基于信号检测的单次与二次散射路径识别[J]. 信号处理, 2020, 36(5): 733-740. DOI: 10.16798/j.issn.1003-0530.2020.05.012.

Reference format: Xie Shaojie, Deng Ping. Single and Secondary Path Recognition Based on Signal Detection in Non-Line-of-Sight Environment [J]. Journal of Signal Processing, 2020, 36(5): 733-740. DOI: 10.16798/j.issn.1003-0530.2020.05.012.

Single and Secondary Path Recognition Based on Signal Detection in Non-Line-of-Sight Environment

Xie Shaojie Deng Ping

(Key Laboratory of Information Coding and Transmission, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 611700, China)

Abstract: Aiming at the problem of identifying single and multiple scattering paths in the NLOS (Non-Line-of-Sight) propagation environments, in this paper a secondary scattering ring model based on single scattering ring model is proposed, and the statistical characteristics of this model are analyzed. At the same time, based on the theory of signal statistical detection, a single-shot and a second-shot scattering path detection model are established. Then, based on whether the prior probabilities are known, the generalized likelihood ratio and Neiman Pearson criterion are utilized to detect and identify the two kind of scattering paths. Simulation results show that the detection and identification method proposed in this paper can effectively identify two scattering paths under the NLOS environment. Compared with the LPMD (Line of Possible Mobile Device) algorithm, it has a higher recognition rate and a smaller false alarm probability and missed alarm probability, and the time overhead is small, it has certain application value.

Key words: secondary scattering; scattering model; non-line-of-sight; signal detection; path recognition

1 引言

在地面无线定位系统中,信号从发射机到达接收机通常有两种传播方式,一种是视距(Line-of-Sight, LOS)传播,另一种是非视距(Non-Line-of-Sight, NLOS)传播。在NLOS传播环境下如何有效克服非视距误差的不利影响从而取得较高的定位精度一直是一个难题^[1]。为此,国内外学者针对抗NLOS误差定位算法开展了广泛深入研究,目前主要有残差加权法、约束最优化法和基于散射体信息法等非视距抑制算法。基于散射体信息的抗NLOS误差定位算法主要可以分为两类:一类是基于散射传播模型的定位算法。这类算法主要通过对圆环、圆盘和高斯散射模型等传播模型的研究,获得各种信号参数的统计分布特性,再对NLOS误差进行抑制来提高定位精度^[2-5];另一类是基于散射体几何位置的定位算法。这类算法利用基站(Base station, BS)、移动台(Mobile station, MS)和散射体三者之间的几何位置关系,建立某种模型以减小NLOS误差的影响从而提高定位精度。例如使用单基站进行定位时,先通过定位单次散射体,然后将其作为虚拟基站,再使用多基站定位算法对移动台进行定位^[6-7];或者利用散射体的相关信息,将NLOS问题转化为LOS问题,再使用LOS下的相关算法进行定位^[8-10]。

但是,现有研究在NLOS环境中一般假定信号仅经过一次散射,较少考虑甚至完全忽略了可能存在的二次以上多次散射的情况,因此在实际应用环境中必然造成算法性能下降。目前仅出现一种基于移动台可能位置线(Line of Possible Mobile Device, LPMD)的算法^[11-12]对NLOS环境中的单次与多次散射路径进行了识别,但识别性能在宏蜂窝环境下比较有限。

目前有少量针对LOS和NLOS传播路径进行识别的研究^[13-15],还鲜有文献研究NLOS环境中如何区分、识别单次与二次以上散射路径信号,通过先识别、定位单次散射体,再将其作为虚拟基站以进一步提升算法定位性能。为此,借鉴文献[15]识别LOS和NLOS传播路径的基本思想,本文参考单次散射圆环模型首次构建了一种二次散射圆环模型,对其二次散射信号统计特征进行分析,再根据单次

和二次这两种散射信号统计特征的差别,基于信号统计检测理论对单次散射路径和二次散射路径进行区识别。仅将识别出的单次散射路径及单次散射体的相关信息与诸如文献[8-10]的基于散射体信息的NLOS定位算法结合使用,将有利于提高NLOS环境下的定位精度。

2 单次与二次散射圆环模型

NLOS环境中,信号在移动台和基站之间传播时可能会经过一次或多次散射,散射体通常会以一定的特征分布在移动台周围,目前宏蜂窝环境下主要的散射体信道模型有单次散射条件下的圆环散射模型(Risk of Scatter, ROS)和圆盘散射模型(Disk of Scatter, DOS)。为此,本文参考单次散射圆环模型建立一种二次散射圆环模型,并应用到后续的单次与二次散射信号检测中。

2.1 单次散射圆环模型

ROS圆环散射模型如下图所示。

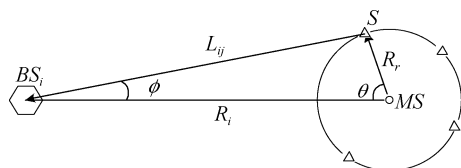


图1 单次散射圆环模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a single scattering ring model

ROS模型中,假定散射体均匀分布在移动站周围半径为 R_r 的圆环上, θ 角服从 $[0, 2\pi]$ 上的均匀分布。设移动站与第 i 个基站的视距距离为 R_i ,基站与移动站之间第 j 条多径分量的距离为 L_{ij} ,NLOS误差为 $\eta_{ij} = L_{ij} - R_i$,可以得到该NLOS测量值的概率密度函数^[16]:

$$P_{\text{ROS}}(L_{ij}) = \frac{L_{ij} - R_i}{R_r R_i \Omega_{ij}}, R_i \leq L_{ij} \leq R_i + 2R_r \quad (1)$$

其中

$$\Omega_{ij} = \sqrt{1 - \left(\frac{R_i^2 - L_{ij}^2 + 2L_{ij}R_r}{2R_r R_i} \right)^2} \quad (2)$$

将 $L_{ij} = \eta_{ij} + R_i$ 代入式(1),可得NLOS误差 η_{ij} 的概率密度函数:

$$P_{\text{ROS}}(\eta_{ij}) = \frac{\eta_{ij} + R_i - R_r}{R_r R_i \Psi_{ij}}, 0 \leq \eta_{ij} \leq 2R_r \quad (3)$$

其中

$$\Psi_{ij} = \sqrt{1 - \left[\frac{\eta_{ij} [2(R_r - R_i) - \eta_{ij}] + 1}{2R_r R_i} \right]^2} \quad (4)$$

2.2 二次散射圆环模型

为了更全面地考虑 NLOS 环境下的信号二次散射问题,本文以单次 ROS 模型^[17]上的每个散射体分别为第二个散射圆环的圆心,然后在此基础上分别再构建一个圆环模型,形成二次散射圆环模型,如图2所示。其中散射体 S1、S2 分别随机均匀分布在半径为 R1、R2 的两个圆环上,S2 与 S1 的距离为 R2,由此 S2 将存在于以 R1-R2 与 R1+R2 为半径构成的环形区域内,即图中两个虚线所绘的圆环之间。

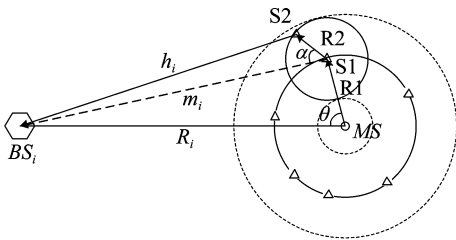


图2 二次散射圆环模型示意图

Fig.2 Schematic diagram of the secondary scattering ring model

在二次散射模型中,信号从移动台经散射体 S1 散射,再经散射体 S2 散射,最终到达基站。假设移动台与第 i 个基站的视距距离为 R_i ,散射体 S1 到基站的 LOS 距离为 m_i ,散射体 S2 到基站的 LOS 距离为 h_i ,散射角 θ 和 α 均服从 $[0, 2\pi]$ 上的均匀分布。

移动台发出的信号经 S1 散射然后到达基站的传播过程可以视作第一次散射过程。信号从 S1 处开始,经 S2 散射,然后到达基站的传播过程可以视作第二次散射过程。信号由移动台出发,经 S1、S2 散射体再到基站的信号传播过程可以视作二次散射过程。上述三个过程对应的第 j 条多径分量造成的 NLOS 误差分别为 η_{ij1} 、 η_{ij2} 和 η_{ij} 。从图2中可知:

$$\eta_{ij1} = m_i + R_1 - R_i \quad (5)$$

$$\eta_{ij2} = h_i + R_2 - m_i \quad (6)$$

$$\eta_{ij} = h_i + R_1 + R_2 - R_i \quad (7)$$

由上式可以推出二次散射的非视距误差为

$$\eta_{ij} = \eta_{ij1} + \eta_{ij2} \quad (8)$$

在式(3)基础上,假设第一次散射与第二次散射的 NLOS 误差概率密度函数分别为 $p_{ROS}(\eta_{ij1})$ 和

$p_{ROS}(\eta_{ij2})$,由于第一次散射与第二次散射过程是相互统计独立的,因此 $p_{ROS}(\eta_{ij1})$ 和 $p_{ROS}(\eta_{ij2})$ 可以分别作为第一次散射和第二次散射的边缘概率密度,在式(8)的基础上,对二者求解联合概率密度,即可得到二次散射圆环 NLOS 误差概率密度函数为

$$p_{SROS}(\eta_{ij}) = \int_0^{2R_1} p_{ROS}(\eta_{ij1}) p_{ROS}(\eta_{ij} - \eta_{ij1}) d\eta_{ij1} \quad (9)$$

2.3 单次与二次散射路径检测模型

假定进行检测时 N 次 NLOS 测量值均服从独立同分布,在检测时间内,MS 位置没有发生变化。根据上述单次和二次散射圆环模型下 NLOS 距离测量值的组成分析,可将其表示为以下假设检验:

$$r_i = \begin{cases} d + n_i + n_s & H_0 \\ d + n_i + n_d & H_1 \end{cases} \quad (10)$$

其中 H_0 、 H_1 分别是单次散射和二次散射的假设, r_i 为第 i 次系统测量值, d 为基站与移动台的 LOS 距离, n_s 、 n_d 分别为单次、二次散射的 NLOS 误差, n_i 为测量噪声。

若已知检测模型中单次散射 NLOS 误差、二次散射 NLOS 误差以及测量噪声的统计特性,即可以使用信号统计检测理论进行单次与二次散射路径的检测。假设测量噪声服从 $N(0, \sigma^2)$,单次散射 NLOS 误差服从 $N(m_s, \sigma_s^2)$,二次散射 NLOS 误差服从 $N(m_d, \sigma_d^2)$,则检测模型的条件假设的概率密度函数分别为:

$$P(r_i/H_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sqrt{\sigma^2 + \sigma_s^2}} \exp\left[-\frac{(r_i - (d + m_s))^2}{2(\sigma^2 + \sigma_s^2)}\right] \quad (11)$$

$$P(r_i/H_1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sqrt{\sigma^2 + \sigma_d^2}} \exp\left[-\frac{(r_i - (d + m_d))^2}{2(\sigma^2 + \sigma_d^2)}\right] \quad (12)$$

3 散射路径检测算法

本文中单次与二次散射路径的检测识别问题可转化为信号统计检测理论中带确定性参数的复合假设检验。根据对 NLOS 传播环境中产生单次及二次散射的先验概率 $P(H_0)$ 和 $P(H_1)$ 的了解程度,可将检测问题分为先验概率已知和未知两种情况分别讨论。

3.1 先验概率已知

在一些特定的 NLOS 传播环境中,如果能基于测试估计出先验概率 $P(H_0)$ 和 $P(H_1)$,并且希望使用确定性参数进行复合假设检验,可以使用广义似然比检验进行门限判决。广义似然比检验是一种相对于经典似然比检验使用场景更加广泛的似然比检验,下面将给出先验概率已知情况下信号检测算法的设计和分析。

在 N 次测量值统计独立的情况下,单次散射与二次散射假设下观测距离矢量 \mathbf{r} 的概率密度函数分别为:

$$P(\mathbf{r}/H_0) = \prod_{i=1}^N P(r_i/H_0) = [2\pi(\sigma^2 + \sigma_s^2)]^{\frac{N}{2}} \exp\left[-\frac{\sum_{i=1}^N (r_i - (d + m_s))^2}{2(\sigma^2 + \sigma_s^2)}\right] \quad (13)$$

$$P(\mathbf{r}/H_1) = \prod_{i=1}^N P(r_i/H_1) = [2\pi(\sigma^2 + \sigma_d^2)]^{\frac{N}{2}} \exp\left[-\frac{\sum_{i=1}^N (r_i - (d + m_d))^2}{2(\sigma^2 + \sigma_d^2)}\right] \quad (14)$$

因此,广义似然比检验可以表示为:

$$\lambda(\mathbf{r}) = \frac{\max_{H_1} P_d(\mathbf{r}/H_1) > P(H_0)}{\max_{H_0} P_d(\mathbf{r}/H_0) < P(H_1)} \quad (15)$$

对上式中的分子和分母分别采用极大似然估计方法求 d 的最大值,可分别得到

$$d_s = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N r_i - m_s \quad (16)$$

$$d_d = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N r_i - m_d \quad (17)$$

带入式(15)化简可得广义似然比检验为:

$$\frac{\sigma_d^2 - \sigma_s^2}{2(\sigma^2 + \sigma_d^2)(\sigma^2 + \sigma_s^2)} \sum_{i=1}^N (r_i - \bar{r})^2 \begin{matrix} > \\ < \end{matrix} \begin{matrix} H_1 \\ H_0 \end{matrix} \quad (18)$$

$$\ln\left(\frac{P(H_0)}{P(H_1)}\right) + \frac{N}{2} \ln\left(\frac{\sigma^2 + \sigma_d^2}{\sigma^2 + \sigma_s^2}\right)$$

其中

$$\bar{r} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N r_i \quad (19)$$

3.2 先验概率未知

在实际 NLOS 传播环境中,一般难以确知两种先验概率。在未知先验概率的情况下,我们可以使用虚警概率作为检测指标,采用奈曼皮尔逊准则来对单次散射路径与二次散射路径进行检测。

在式(18)的基础上进行变换,可得到判决表达式:

$$\frac{\sum_{i=1}^N (r_i - \bar{r})^2}{(\sigma^2 + \sigma_s^2)} \begin{matrix} > \\ < \end{matrix} \begin{matrix} H_1 \\ H_0 \end{matrix} \quad (20)$$

其中

$$\gamma = 2 \ln\left(\frac{P(H_0)}{P(H_1)}\right) \left(\frac{\sigma^2 + \sigma_d^2}{\sigma_d^2 - \sigma_s^2}\right) + N \ln\left(\frac{(\sigma^2 + \sigma_d^2)}{(\sigma^2 + \sigma_s^2)}\right) \left(\frac{\sigma^2 + \sigma_d^2}{\sigma_d^2 - \sigma_s^2}\right) \quad (21)$$

由于在先验概率未知情况下, $P(H_0)$ 和 $P(H_1)$ 未知,因此可将整个表达式用 γ 表示,作为待求判决门限值。

根据奈曼皮尔逊准则,判决门限 γ 可以表示为:

$$P\left\{\frac{\sum_{i=0}^N \left(r_i - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N r_i\right)^2}{(\sigma^2 + \sigma_s^2)} > \gamma \mid \sigma = \sigma_d\right\} = \alpha \quad (22)$$

其中 α 为检测的虚警概率,可独立于测量值设置。由概率统计理论可知,在统计量的样本数量为 N ,统计量的自由度为 $N-1$ 情况下,式(20)左侧服从自由度为 $N-1$ 的 χ^2 卡方分布,可以通过下式求得判决门限 γ :

$$\int_{\gamma}^{\infty} \chi_{N-1}^2(x) dx = \alpha \quad (23)$$

3.3 算法主要步骤和流程图

本文中单次与二次散射路径检测算法主要分为以下几步。首先,根据不同地理环境,预先评估本次检测中是否已知单次与二次散射的先验概率。当先验概率已知时,通过广义似然比检验完成对单次与二次散射路径的识别;当先验概率未知时,基

于假定的虚警概率,通过奈曼皮尔逊准则完成对单次与二次散射路径的识别。算法流程图如图 3 所示。

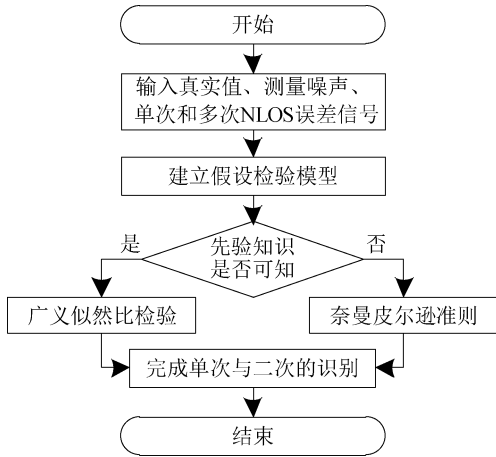


图 3 算法流程图
Fig. 3 Algorithm flow graph

4 算法仿真与分析

本文参考 Nokia 公司现场测量数据,对检测算法性能进行仿真分析。根据文献 [18-20] 和 Nokia 公司的测量结果,在各基站间距离约为 5000 m,基站与移动台相距约 2500 m 的情况下,其测量噪声和 NLOS 环境下的统计特性均服从高斯分布,其中测量噪声服从均值为 0 m,标准差为 150 m 的高斯分布,NLOS 误差信号服从均值为 513 m,标准差为 409 m 的高斯分布。本节将参照以上场景进行仿真,测量噪声服从 $N(0, \sigma^2)$,其中 $\sigma = 150$ 。假设第一个圆环散射半径为 530 m,可以通过单次散射圆环模型得到信号经过单次散射的 NLOS 误差服从 $N(m_s, \sigma_s^2)$,其中 $m_s = 557, \sigma_s = 373$,与 Nokia 公司测量数据的统计特性相接近。在此基础上假设第二个圆环散射半径为 500 m,并可以通过二次散射圆环模型得到信号经过两次散射后的 NLOS 误差服从 $N(m_d, \sigma_d^2), m_d = 1082, \sigma_d = 510$ 。以上均为先验概率已知和未知两种情况的仿真场景,本节最后将给出 LPMD 算法与信号检测算法的仿真场景及对比分析。

(1) 先验概率已知

第一个仿真场景是在先验概率已知的情况下,算法对单次散射信号与二次散射信号测量值进行检测识别。图 4 给出了当先验概率为 $P(H_0) = 0.5,$

$P(H_1) = 0.5$ 时,信号检测算法对单次与二次散射信号测量值的识别结果,其中横轴为测量次数,纵轴为式(18)中的计算结果。图 5 则给出了当 $P(H_0) = 0.8, P(H_1) = 0.2$ 时, $P(H_0) = 0.5, P(H_1) = 0.5$ 时以及 $P(H_0) = 0.2, P(H_1) = 0.8$ 时,信号检测算法的识别率随测量次数的变化情况。

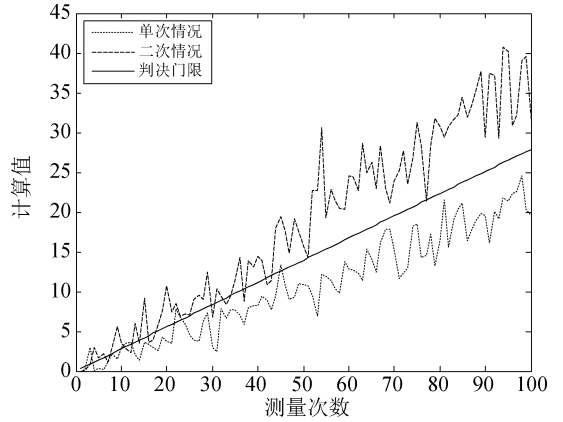


图 4 单次与二次散射先验概率相等时信号检测算法的识别结果

Fig. 4 Recognition results of signal detection algorithm when single and second scattering prior probabilities are equal

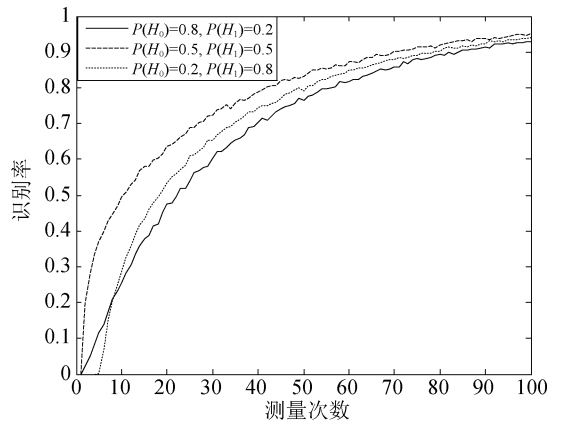


图 5 不同先验概率下信号检测算法的识别率
Fig. 5 Recognition rate of signal detection algorithm under different prior probabilities

由图 4 可知,在单次散射路径与二次散射路径概率相近的情况下,算法求得的门限值位于单次散射计算值和二次散射计算值之间,且与二者均保持着一定的距离,测量次数接近 50 次即可进行准确识别。由图 5 可知,在三种不同先验概率下,单次散射信号与二次散射信号比例相近时识别效果最好,而当仅有单次散射信号或者仅有二次散射信号在系

统环境占据主导地位时,其统计检测量会分别向判决门限靠近而导致漏警概率或虚警概率增大,从而使识别率下降。在上述情况中,算法在测量次数较少的情况下,会存在一定的误判概率,这是因为测量数据过少而使得算法不稳定。随着测量次数的增加,算法识别性能趋于稳定,单次和二次散射信号检测统计量与判决门限的距离随之增大,识别效果也更好。

(2) 先验概率未知

第二个仿真场景是在先验概率未知的情况下,预先设置系统的虚警概率,然后对单次散射信号与二次散射信号测量值进行检测识别。图6是在虚警概率 $\alpha=0.1$ 时的仿真结果,其中横轴为测量次数,纵轴为式(20)中的计算结果。图7则给出了在虚警概率分别为 $\alpha=0.2$ 、 $\alpha=0.1$ 和 $\alpha=0.05$ 时,信号检测算法的识别率随测量次数的变化情况。

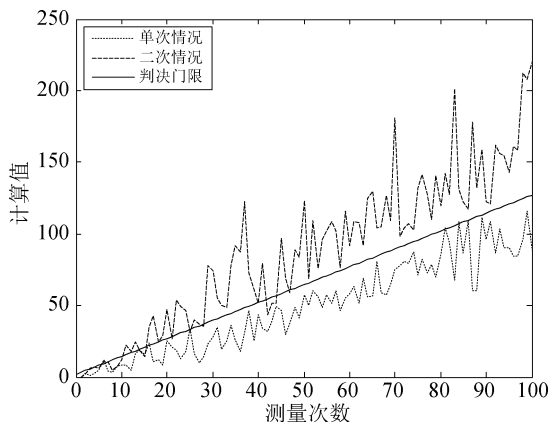


图6 虚警概率为0.1时信号检测算法的识别结果

Fig.6 Recognition result of signal detection algorithm when false alarm probability is 0.1

从图6可知,单次散射信号检测统计量和二次散射信号检测统计量均与门限值保持着一定的距离,算法在预设的虚警概率下能较好地区分单次散射与二次散射路径。由图7可知,在测量次数较大时,随着虚警概率的减小,算法的检测性能也有所增加。在测量次数较少的情况下,算法同样存在不稳定的情况,不过随着测量次数的增加,单次和二次散射的检测统计量与判决门限的距离随之拉大,识别效果也越好。因此,在先验概率未知的情况下,该算法同样具有良好的单次与二次散射信号检

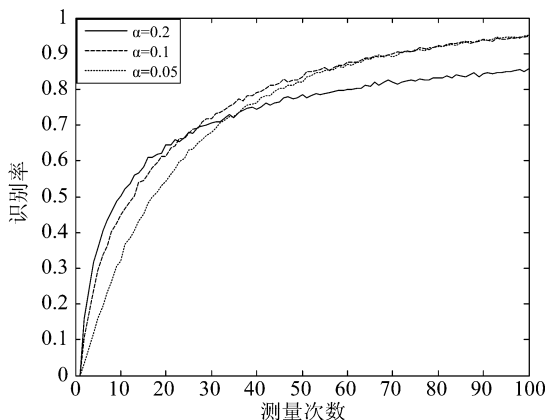


图7 不同虚警概率下信号检测算法的识别率

Fig.7 Recognition rate of signal detection algorithm under different false alarm probabilities

测识别性能。

(3) LPMD 算法与信号检测算法性能比较

本次仿真将对 LPMD 算法与本文信号检测识别算法进行对比分析。仿真中假设单次散射概率与二次散射概率相等,散射半径依次增大。即在 LPMD 算法仿真中,单次散射与二次散射路径数相等,散射体服从 ROS 圆环散射,半径依次增大。在信号检测算法仿真中,假设 $P(H_0)=0.5$, $P(H_1)=0.5$,两个圆环半径之和与前者保持相等,且保持相同比例,取测量次数为50次。算法均独立仿真1000次。图8分别给出了两种识别算法的虚警概率、漏警概率和正确识别率。

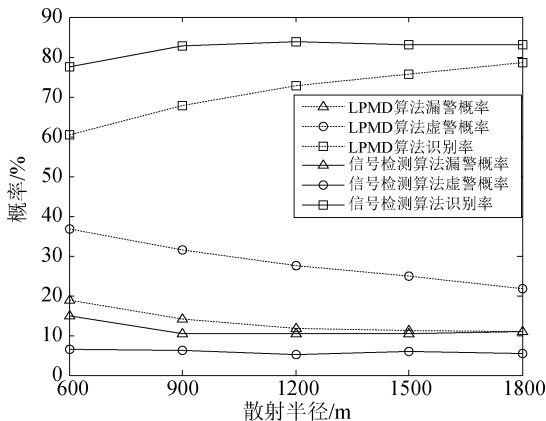


图8 LPMD 算法与信号检测算法的识别性能比较

Fig.8 Comparison of recognition performance between LPMD algorithm and signal detection algorithm

从图8中可以看出,随着散射半径的增加,基于 LPMD 的识别算法和基于信号检测的识别算法的识

别率均随之增加,虚警概率和漏警概率均随之减少,且后者相较于前者在识别率上有所提升,而虚警概率和漏警概率有所下降。因此,在一定的测量次数下,相对于传统的 LPMD 识别算法,信号检测算法具有更好的识别效果。

5 结论

本文针对传统 NLOS 散射模型中忽略多次散射路径,将多径散射简化而统一看作单次散射这一问题,建立了一种基于 ROS 的二次散射模型,并提出一种信号统计检测算法,基于是否已知先验概率对单次与二次散射路径进行识别,甄别出产生单次散射路径的散射体,为单次散射体定位打下良好基础。

从仿真结果可见,无论先验概率是否已知,基于信号检测的单次与二次散射信号的识别算法均具有良好的识别性能,并且随着测量次数的增加,算法趋于稳定,检测性能也越来越高。需要注意的是,算法中对于测量次数的取值不宜过小或过大,过小会由于测量数据太少而导致误判概率增大,过大则会增加时间成本,因此可以根据实际需求适当选取,使得时间成本较低的同时,也能保证算法具有较高的识别率。

如何获取实际 NLOS 环境中的散射半径等信息,并将本文算法与多种基于散射体信息和散射模型的抗 NLOS 误差定位算法进行融合,以进一步提升 NLOS 环境下对 MS 的定位性能,是后续需要研究的重要课题。

参考文献

- [1] Hsu L. Analysis and Modeling GPS NLOS Effect in Highly Urbanized Area[J]. *GPS Solutions*, 2018, 22(7): 1-12.
- [2] Liu Lin, Deng Ping, Fan Pingzhi. A TOA Reconstruction Method Based on Ring of Scatterers Model[C]//Proceedings of the Fourth International Conference on Parallel and Distributed Computing, Applications and Technologies. IEEE, 2003: 375-377.
- [3] Liu Lin, Fan Pingzhi. An Improved NLOS Error Mitigation TOA Reconstruction Method[C]//2006 IET International Conference on Wireless, Mobile and Multimedia Networks. IEEE, 2006: 1-3.
- [4] Zhang Weiyi, Chen Xiuwan, Wan Jiahuan, et al. GPS/Cellular Network Hybrid Positioning Method Based on Two Scatter Model[C]//2012 International Conference on Computer Science and Electronics Engineering. IEEE, 2012: 98-103.
- [5] 田增山, 舒月月, 周牧, 等. 基于 B-LM 圆环模型的 NLOS 信息约束单基站定位算法[J]. *电子与信息学报*, 2018, 40(10): 2316-2322.
Tian Zengshan, Shu Yueyue, Zhou Mu, et al. Single Base Station Localization Algorithm Based on B-LM Ring of Scattering Model Using NLOS Information[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(10): 2316-2322. (in Chinese)
- [6] Yang Tianchi, Jin Liang. Single Station Location Method in NLOS Environment: The Circle Fitting Algorithm[J]. *Science China Information Sciences*, 2011, 54(2): 381-385.
- [7] Zhang Rui, Xia Weiwei, Yan Feng, et al. A Single-Site Positioning Method Based on TOA and DOA Estimation Using Virtual Stations in NLOS Environment[J]. *China Communications*, 2019, 16(2): 146-159.
- [8] Kim J. Fast Non-Line-of-Sight Receivers Conjecturing Method in TDOA Localisation Using Obstacle Information [J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2019, 13(3): 347-351.
- [9] Ma Yongtao, Wang Bobo, Pei Shuyang, et al. An Indoor Localization Method Based on AOA and PDOA Using Virtual Stations in Multipath and NLOS Environments for Passive UHF RFID [J]. *IEEE Access*, 2018, 6(1): 31772-31782.
- [10] Liu Deliang, Wang Ying, He Peng, et al. TOA Localization for Multipath and NLOS Environment with Virtual Stations[J]. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2017, 104(1): 1-7.
- [11] Seow C K, Tan S Y. Non-Line-of-Sight Localization in Multipath Environments[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2008, 7(5): 647-660.
- [12] 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, 1(1): 182-188.
Deng Ping, Rui Yang, Deng Shuifa. A Novel Scattering Path Recognition Algorithm Based on LPMD[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2018, 1(1): 182-188. (in Chinese)
- [13] Hu Boyang, Tian Hui, Fan Shaoshuai. Millimeter Wave LOS/NLOS Identification and Localization via Mean-Shift

- Clustering [C] // 2019 IEEE 30th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). IEEE, 2019: 1-7.
- [14] Zhan Shigeng, Yang Chengwei, Jiang Danming, et al. Nothing Blocks Me: Precise and Real-Time LOS/NLOS Path Recognition in RFID Systems [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(3): 5814-5824.
- [15] 颜俊, 陈亮, 吴乐南. 基于信号检测法的 NLOS 识别 [J]. 信号处理, 2009, 25(12): 1848-1852.
Yan Jun, Chen Liang, Wu le-nan. NLOS Identification via Signal Detection Algorithm [J]. Journal of Signal Processing, 2009, 25(12): 1848-1852. (in Chinese)
- [16] Jazzar S A, Caffery J, You H R. A Scattering Model Based Approach to NLOS Mitigation in TOA Location Systems [C] // IEEE 55th Vehicular Technology Conference. IEEE, 2002: 861-865.
- [17] Ertel R B, Reed J H. Angle and Time of Arrival Statistics for Circular and Elliptical Scattering Models [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1999, 17(11): 1829-1840.
- [18] Liao J F, Chen B S. Robust Mobile Location Estimator with NLOS Mitigation using Interacting Multiple Model Algorithm [J]. IEEE Transactions on Wireless Communi-
cations, 2006, 5(11): 3002-3006.
- [19] Wylie M P, Holtzman J. The Non-Line of Sight Problem in Mobile Location Estimation [C] // Proceedings of ICUPC-5th International Conference on Universal Personal Communications. IEEE, 1996: 827-831.
- [20] Silventoinen M I, Rantalainen T. Mobile Station Emergency Locating in GSM [C] // 1996 IEEE International Conference on Personal Wireless Communications Proceedings and Exhibition. IEEE, 1996: 232-238.

作者简介



谢少杰 男, 1995 年生, 湖南永州人。西南交通大学研究生, 主要研究方向为无线网络定位技术。

E-mail: xieshaojiex@126.com



邓平 男, 1964 年生, 四川宜宾人。西南交通大学教授, 博士, 主要研究方向为无线网络定位技术、现代信号处理、无线传感网络。

E-mail: pdeng@swjtu.edu.cn