DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2015.04.025

定位精度自适应系统设计与性能分析①

李　林

重庆电子工程职业学院，重庆 401331

摘要：位置感知是认知无线电应用的核心技术之一. 为了提供不同的位置感知应用，认知无线电系统的定位应支持自适应精度. 以 ZZLB 信息作为最优化设计准则，采用 ML 时延估计算法，设计一种依据环境和业务需求自适应调整测距精度的认知定位方案，并提出一种能适应宽信噪比的测距精度自适应算法——ML-TOA 算法. 分别从不同角度分析 ML-TOA 算法的性能. 仿真结果表明，该方案在宽信噪比场景能较好地实现测距精度自适应.

关　键　词：无线定位；测距；自适应；认知无线电

中图分类号：TP873　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1673-9868(2015)04-0153-05

认知无线电[1](Cognitive Radio，CR)是一种能够感知外部环境、自适应调整传输参数并对过去经验进行学习的智能无线通信技术，位置感知是认知无线电系统的重要研究内容之一. 利用终端定位参数，系统能提供空间差异化服务、基于位置的系统优化、环境辨识等.

GPS 系统应用广泛，但难以满足认知无线电节点设计小体积、低功耗以及定位精度自适应的要求. 基于接收信号强度(Received Signal Strength，RSS)、到达角度(Angle of Arrival，AOA)和到达时间(Time of Arrival，TOA)是传统的位置估计技术. RSS 估计器的性能取决于路径损耗因子、阴影衰落标准差等信道参数，CR 无法控制信道参数，只能通过测量信道参数来调整精度[2]. AOA 需要采用天线阵列，实现困难，且对如室内传播信道等强多径环境、天线阵列并非有效. 而 TOA 估计的定位精度主要取决于收发信机的可控参数，适用于在 CR 系统中应用. 文献[3]提出了一种基于发射端的，以与测距精度、收发信机以及信道参数相关的 Cramer-Rao Lower Bound (CRLB)信息为参数的最优化准则，接收端采用 ML(Maximum Likelihood)时延估计实现定位精度自适应算法，在高接收信噪比和长观察时间前提下能达到良好的性能. 考虑到在不同空间区域和服务差异化要求下，接收信噪比变化范围大，Ziv-Zakai Lower Bound(ZZLB)比 CRLB 更符合 ML 时延估计的处理要求，本文以 ZZLB 信息作为发射端参数最优化准则，设计一种能根据环境和业务需求自适应调整测距精度的认知定位方案，提出一种能适应宽信噪比的测距精度自适应算法，并对其进行仿真分析和评价.

1　定位精度自适应系统

定位精度自适应系统结构框图如图 1 所示[3]，图中认知引擎(Cognitive Engine，CE)提供基于任务和目标驱动的优化策略；频谱感知引擎(Spectrum Sensing Engine，SSE)执行所感知频段的频谱可用性检测与判决；环境感知引擎(Environment Sensing Engine，ESE)用于检测和评估传输环境特征；而位置感知引擎(Location Sensing Engine，LSE)处理涉及到位置信息的相关任务. 各引擎之间存在直接或非直接(通过认知引擎)的合作关系，如环境感知引擎感知环境参数并将结果提供给位置感知引擎，频谱感知引擎将可

① 收稿日期：2014-07-01
基金项目：重庆市教委科学技术研究项目(KJ102201)资助.
作者简介：李　林(1976-)，男，硕士，副教授，主要从事通信信号处理方面的研究.

用频谱信息提供给位置感知引擎等. 由此可知，为了提供业务差异化和空间差异化的定位精度要求，发端应依据特定准则优化工作参数，并据此生成发射信号波形，收端运行相应的参数估计算法获得位置感知的传输参数估计值.

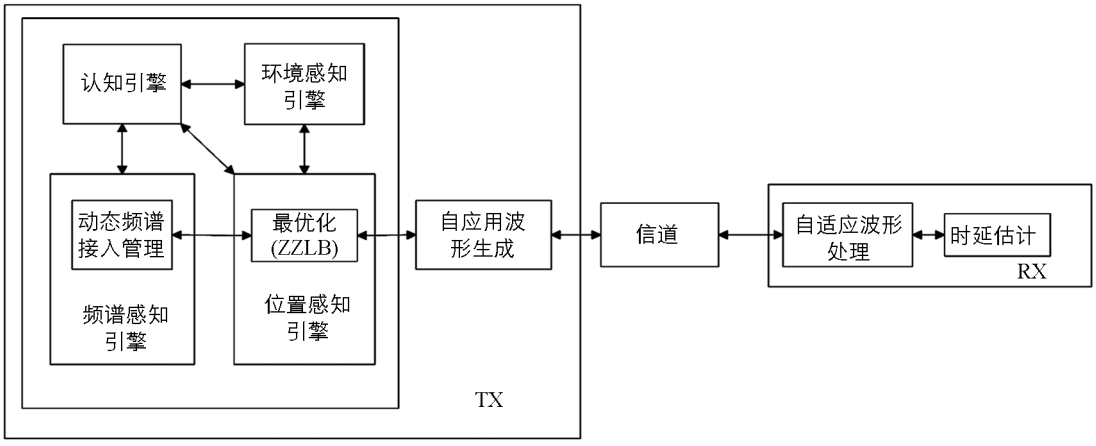


图1 定位精度自适应系统结构框图

2 基于TOA的定位精度自适应算法

定位精度自适应系统以TOA为估计参数，采用ML时延估计算法，力图在宽接收信噪比条件下获得所需要的测距精度. 假设发射信号波形为 $s(t)$，持续时间为 T，带宽为$[-B/2, B/2]$，则接收信号为

$$r(t)=\alpha s(t-\tau)+n(t) \tag{1}$$

式中 α 是信道衰减参数；τ 是信号传输时延，在$[0, T]$上服从的概率密度函数为 $p_\tau(\tau)$，$p_\tau(\tau)$ 在 $|\tau-m_\tau|$ 内对称且非增长，其均值为 m_τ、方差为 σ_τ^2；$n(t)$ 是噪声，服从均值为0、方差为 σ^2 的高斯分布.

通过对接收信号 $r(t)$ 执行ML时延估计算法即可获得传输时延 τ 的估计值，进而解算出被测终端的位置信息. 假设信道衰减参数 α 已知，那么传输时延 τ 是接收信号 $r(t)$ 中唯一的未知参数，以信号波形持续时间 T 为观察时间，文献[3]给出了 τ 的ML估计：

$$\hat{\tau}_{\mathrm{ML}} \approx \underset{\tau}{\arg\max}\left\{\frac{1}{\sigma^2}\int_0^T \alpha r(t)s(t-\tau)\mathrm{d}t\right\} \tag{2}$$

文献[4]进一步导出了基于ML时延估计的均方误差低限：

$$LB \geqslant \sigma_\tau^2 \cdot 2\Phi\left(\sqrt{\frac{E}{2N_0}}\right)+\frac{N_0}{\beta^2 E}\Gamma_{\frac{3}{2}}\left(\frac{E}{4N_0}\right) \tag{3}$$

其中：

$$\Phi(z)=\int_z^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{v^2}{2}}\mathrm{d}v \tag{4}$$

$$\Gamma_a(z)=\frac{1}{\Gamma(a)}\int_0^z e^{-v}v^{a-1}\mathrm{d}v \tag{5}$$

$N_0/2$ 为噪声功率谱密度，E 为信号能量：

$$E=\int_{-\infty}^{\infty} s^2(t)\mathrm{d}t \tag{6}$$

用 $S(\omega)$ 表示 $s(t)$ 的傅里叶变换，应用帕斯瓦尔定理，将式(6)变换为

$$E=\int_{-\infty}^{\infty} 2|S(\omega)|^2\frac{\mathrm{d}\omega}{2\pi} \tag{7}$$

β^2 表示信号占用的信道有效带宽：

$$\beta^2=\frac{\int_0^\infty |S(\omega)|^2\omega^2\mathrm{d}\omega}{\int_0^\infty |S(\omega)|^2\mathrm{d}\omega} \tag{8}$$

从式(3)可以看出，LB 依赖于接收信噪比、σ_τ^2 和 β^2. 当要求的时延估计精度一定时，接收信噪比和信道有效带宽之间可以互换. 同时，注意到：

1) 当 $\dfrac{E}{N_0}\to 0$ 时，$2\Phi\left(\sqrt{\dfrac{E}{2N_0}}\right)\to 1$，同时 $\Gamma_{\frac{3}{2}}\left(\dfrac{E}{4N_0}\right)\to 0$；

2) 当 $\dfrac{E}{N_0}\to \infty$ 时，$2\Phi\left(\sqrt{\dfrac{E}{2N_0}}\right)\to 0$，同时 $\Gamma_{\frac{3}{2}}\left(\dfrac{E}{4N_0}\right)\to 1$.

由此可知，接收信噪比较小时，LB 主要取决于式(3)等式右边第 1 项，其近似值为 σ_τ^2；接收信噪比较大时，LB 主要取决于式(3)等式右边第 2 项，其近似值为 $N_0/E\beta^2$.

本文将式(3)作为定位精度自适应的优化准则，进一步假定：通信系统为窄带系统、参与定位的所有节点同步、可用频谱信息和信道参数信息已知.

基于 TOA 的定位精度自适应算法流程描述如下：

第 1 步：LSE 从 CE 处提取定位精度需求指标 σ_d；从 SSE 和 ESE 处提取可用频谱信息和信道参数；

第 2 步：LSE 通过最优化处理从可用信道集合中选择最佳传输信道：

1) 对可用信道集合中的所有信道，依据下式计算定位精度：

$$\overline{\sigma_d}=c\cdot\sqrt{LB} \tag{9}$$

式中，c 为光速.

2) 依据最小化定位精度均方误差选择最佳传输信道 B，即

$$B=\underset{\tilde{B}}{\arg\min}(\overline{\sigma_d}-\sigma_d)^2 \tag{10}$$

第 3 步：发端依据传输参数生成发射信号波形；

第 4 步：发端利用所选传输信道发射信号，收端接收并处理信号，执行 ML 时延估计算法获得传输时延估计值.

3　性能分析

为了测试和评估基于 TOA 的定位精度自适应算法的性能，假定在定位精度自适应系统中，发端生成的发射信号波形为

$$s(t)=\sqrt{\frac{2E}{3T}}\left(1-\cos\left(\frac{2\pi t}{L}\right)\right)\qquad 0\leqslant t\leqslant L \tag{11}$$

其相关函数为

$$\rho(h)=\begin{cases}\dfrac{1}{3}\left(1-\dfrac{h}{L}\right)\left(2+\cos\left(\dfrac{2\pi h}{L}\right)\right)+\dfrac{1}{2\pi}\sin\left(\dfrac{2\pi h}{L}\right) & 0\leqslant h\leqslant L\\ 0\end{cases} \tag{12}$$

取 $\beta^2=4\pi^2/3L^2$，$\sigma_\tau^2=T^2/12$，$\beta^2\sigma_\tau^2=40$，分别以 ZZLB 和 CRLB 为优化准则，运行 ML 时延估计算法获得的时延估计均方误差 MSE 与接收信噪比之间的关系曲线如图 2 所示. 由图可知，随着接收信噪比 $E=\dfrac{N_0}{db}$ 的增加，$MSE=\dfrac{T^2}{12}$ 呈下降趋势；在低接收信噪比区域，MSE 较大，这是由于时延估计误差取决于相关函数的峰值检测误差，接收信噪比低，意味着接收信号能量小，峰值检测误差大；随着接收信噪比的增加，相关函数的峰值检测越准确，MSE 逐渐减小. 由图还可发现，当接收信噪比变化范围较宽时，运行 ML 时延估计算法获得的 MSE 接近 LB，表明基于 ZZLB 优化准则更能体现 ML 时延

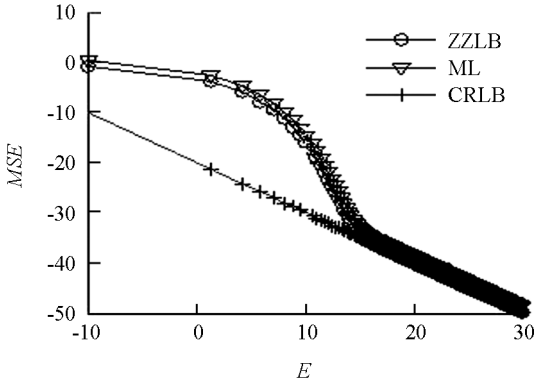
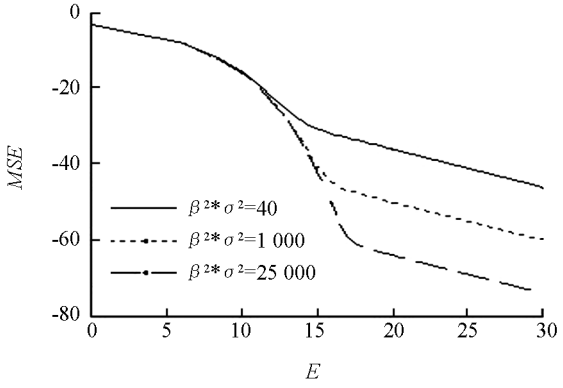


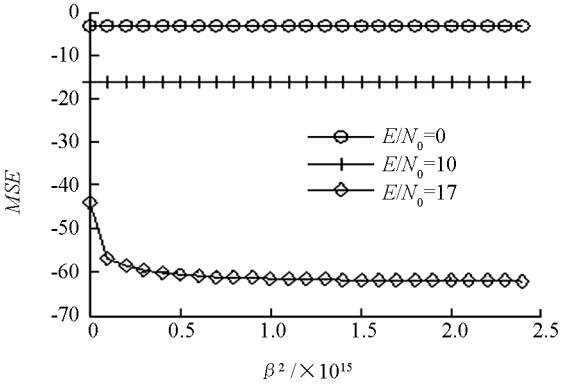
图 2　基于 ZZLB 和 CRLB 的定位性能对比曲线

估计算法的性能.

图3所示为在不同信道带宽和接收信噪比条件下时延估计均方误差的变化曲线，图3(a)是不同信道带宽下 MSE 与接收信噪比之间的关系曲线；图3(b)是不同接收信噪比下 MSE 与信道带宽之间的关系曲线. 由图可知，当接收信噪比较低时，增大信道带宽对 MSE 的影响很小，此时必须增大信号发射功率才能保证定位精度要求，而当接收信噪比较高时，增大信道带宽可降低 MSE.



(a) 不同信道带宽下MSE与接收信噪比之间的关系



(b) 不同接收信噪比下MSE与信道带宽之间的关系

图3 ZZLB性能分析

图4－图6进一步从不同角度表征了基于TOA的定位精度自适应算法的性能. 假定信道带宽在[1MHz，2MHz]之间动态变化，信道数为100，依据不同空间区域和业务差异化对定位精度的要求为在[20，35]之间均匀分布的10个值，定位精度相对误差为

$$e=\frac{\sigma_d-\sigma_{\hat{d}}}{\sigma_d} \tag{13}$$

其中 $\sigma_{\hat{d}}$ 为运行ML时延估计算法获得的定位精度估计值.

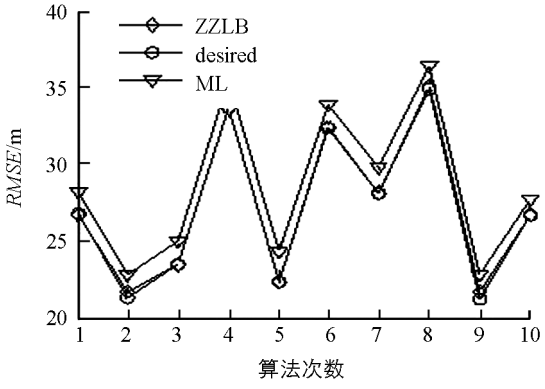


图4 ML时延估计算法的自适应性能

由图可知，基于TOA的定位精度自适应算法能通过从可用信道集合中选择适当带宽的信道发送定位信号波形，从而获得所需的定位精度.

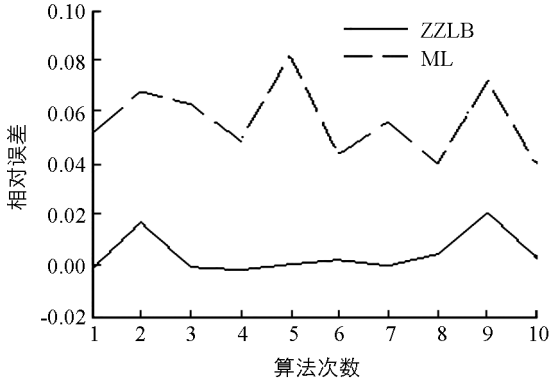


图5 ML时延估计算法的定位精度相对误差

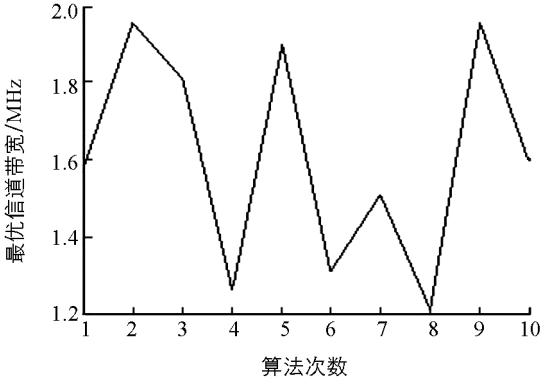


图6 ML时延估计算法带宽自适应性能

4 结 论

基于TOA位置估计技术，以ZZLB作为传输参数的优化准则，采用ML时延估计算法，设计了一种依

据不同空间区域和业务差异化需求的定位精度自适应系统方案，并提出了一种能适应接收信噪比变化的时延估计算法. 分别从不同信道带宽、不同定位精度要求等角度分析了该系统的定位性能，结果表明，该系统在宽信噪比变化情况能较好地实现定位精度自适应.

参考文献：

[1] J MITOLA III, MAGUIRE G O. Cognitive Radio: Making Software Radio More Personal [J]. IEEE Trans on Personal Communications, 1999, 6(4): 13－18.

[2] CELEBI H, ARSLAN H. Cognitive Positioning Systems [J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2007, 6(12): 4475－4483.

[3] CELEBI H. Location Awareness in Cognitive Radio Networks [D]. FL, University of South Florida, Aug. 2008.

[4] BELL K L, STEINBERG Y. Extended Ziv-Zakai Lower Bound for Vector Parameter Estimation [J]. IEEE Trans on Information Theory, 1997, 43(2): 624－637.

Design and Performance Analysis of a Location Accuracy Adaptation System

LI　Lin

Chongqing College of Electronic Engineering, Chongqing 401331, China

Abstract: Location awareness is one of the core technologies in the field of application of cognitive radio. In order to provide different application for location awareness, the positioning system of cognitive radio should support the accuracy adaptation capability. Based on maximum likelihood (ML) time of arrival (TOA) range accuracy adaptation technique, the performance of ranging accuracy adaptation system under a large range of SNR (signal-to-noise ratio) is evaluated. The results of a simulation test show that range accuracy adaptation can be achieved under high SNR.

Key words: wireless location; distance measurement; adaptation; cognitive radio

责任编辑　汤振金