

# 基于 Ontology 的应急知识库的知识表示

金保华, 林青, 付中举

(郑州轻工业学院 计算机与通信工程学院, 河南 郑州 450002)

**摘要:**针对应急知识库的构建与知识表达中的结构化知识表示问题,采用 RDF/OWL 技术及 Protégé 本体编辑工具构建了应急知识库,设计了基于 Ontology 的应急知识库语义模型.结果表明该应用研究能够为应急知识库中知识的表达提供良好的技术支持,也可为后续的知识推理工作奠定基础.

**关键词:**应急知识库;Ontology 模型;知识表示;语义模型

**中图分类号:**TP18 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2012.05.022

## Knowledge representation of emergency knowledge base based on Ontology

JIN Bao-hua, LIN Qing, FU Zhong-ju

(College of Comp. and Com. Eng., Zhengzhou Univ. of Light Ind., Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** To solve the problem of establishment of emergency knowledge base and structural knowledge representation, the emergency knowledge base model based on Ontology was designed. RDF/OWL technology and Protégé ontology editor tool were used to establish emergency knowledge base, the semantic model of emergency knowledge base was designed based on Ontology. The result showed that the research provided great technical support to knowledge representation in emergency knowledge base. Moreover, it also laid the foundation to the following reasoning work.

**Key words:** emergency knowledge base; Ontology model; knowledge representation; semantic model

## 0 引言

随着各类突发事件的频繁发生,应急指挥过程中形成的策略和采取的措施的重要性日益突显.为了能够在海量的数据和应急信息面前,有效地实现应急决策,应急知识库的构建势在必行.应急知识库的知识表示是应急知识库的核心,也是构建应急知识库的基础.

知识表示是人工智能中的经典问题,是指对知识的一种描述或者约定,即将知识能够通过编码等方式转化为固定的数据结构表示出来.从国内外研究情况来看,现有的应急知识领域模型研究大都侧

重于某一领域突发事件(如洪水、地震等).在应急管理信息系统知识建模的过程中,较为典型的有:SAIDA 系统知识模型、基于情景的知识建模和基于 CommonKADS 方法的知识建模等.而在应急知识库的知识表示、推理方面,已经有一定数量的文献对此进行了相关的研究.刘征等<sup>[1]</sup>将应急知识库的建立分解为若干个简单问题的求解,并通过推理机提供应急必要的知识与解决方案,侧重的是系统在多领域的求解.姚金国等<sup>[2]</sup>以汉语自然语言文本为研究对象,采用词典驱动的规则匹配方法从应急领域文本中提取应急领域因果知识,侧重基于规则类的知识工程研究.本文拟引入 Ontology 模型,对

收稿日期:2012-06-09

作者简介:金保华(1966—),男,河南省郑州市人,郑州轻工业学院副教授,博士,主要研究方向为人工智能、计算机辅助决策系统.

Ontology建模中的基础性描述<sup>[3]</sup>、对应急知识库中的知识表示进行研究,以期为更好地表达突发事件领域的应急知识提供新的思路。

## 1 基于 Ontology 的应急知识库的知识表示模型设计

应急知识库的涵盖面广,其应用范围包含了以应急决策支持系统为服务中心的各个层面. 应急知识库的描述包含以下要素:

- 1) 突发事件中有哪些事件以及这些事件的本质及其分类;
- 2) 说明什么情况下会出现该情况,即突发事件的触发机理;
- 3) 作为集体或个人如何预防;
- 4) 要解决如何应急处置;
- 5) 如何恢复突发事件造成的后果,特别是不利的后果.

以上要素的主要功能是进一步地为应急决策人员提供决策依据. 因此,应急知识库作为应急决策支持系统的核心构成部分,其重要的作用是在突发事件发生过程中连接应急决策系统各子系统,相互调用传输时提供共同的数据支持,并利用其内部处理机制反馈合理的专业知识给相应的子系统. 本文把 Ontology 建模引入应急知识库的构建,便于应急人员在处理突发事件时进行知识交流与知识共享. 本文设计的基于 Ontology 的应急知识库整体规划图如图 1 所示. 数据层的服务主要由系统所采用的数据库提供支持,业务逻辑层将由相应的 JAVA 开发软件在 B/S 模式上架构开发且与下层交互. 本文重点针对语义层领域的 Ontology 知识库构建、应急规则描述和基于规则的推理展开研究.

## 2 应急知识库 Ontology 的构建与知识表示

### 2.1 Ontology 模型定义与描述语言

Ontology 的本质是对某领域静态概念模型的描述,用公认的术语集和这些术语之间的关系来反映该领域内的知识和知识结构,具有概念性、明确性、形式性和共享性 4 个特性. 钟秀琴等<sup>[4]</sup>认为知识表示形式将直接影响到知识库系统的性能. 为了更好地描述 Ontology,已经出现了众多 Ontology 描述语言<sup>[5-6]</sup>,例如, XOL, SHOE, OML, OIL, RDF/RDFS 与 OWL 等. OWL 是建立在 RDFS 的基础之上,吸取了

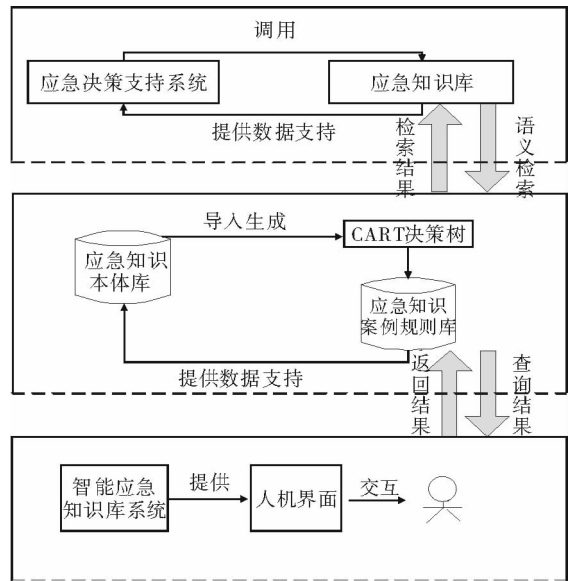


图 1 基于 Ontology 的应急知识库整体规划图

DAML + OIL 的优点而形成的 Ontology 语言,其最新版本在 2010 年 8 月由 W3C 组织正式发布并推荐使用<sup>[7]</sup>. 相比其他的 Ontology 语义语言,OWL 语义机制的优势更为突出,因此,本文的研究实验以 RDF/RDFS 与 OWL 语言为主.

### 2.2 应急知识库 Ontology 的概念词、层次关系和属性

根据 Ontology 的定义可知,应急知识库 Ontology 应形式化地表示应急知识领域中知识的基本概念、内在关系、个体实例和推理规则. 因此,定义应急知识库本体模型为四元的应急本体模型,表示为  $Ontology ::= \langle Concepts, Relations, Individuals, Rules \rangle$ .

在分析应急知识领域的知识记录的基础上,通过机器学习的方法从应急预案、应急管理规定以及大量的突发事件案例中抽取应急管理领域(涵盖应急预案、应急案例、应急组织以及应急资源等)相关的术语和定义、缩略语、标准行话、常用同义词等,构建一个应急知识领域词典. 其中,核心概念词应依据本体个体的最小单位(即知识记录),选定为事件定义、触发条件、预防措施、应急方案、事后恢复办法、知识来源.

在获取了领域以内的概念词之后,需要进行类的定义,并将这些概念词归类到不同的类下以构成良好清晰的可复用的架构关系. 根据国家突发事件知识层次分类标准,将突发事件知识分成自然灾害、事故灾难、公共卫生事件以及社会安全事件

4 类,并细分各子类. 在 OWL 中自定义得到的类都是 owl:Thing 的一个子类,整个本体的根节点由 owl:Thing 为起始. 例如,将自然灾害设定为应急知识的分类,然后将水旱灾害设定为自然灾害的子类,其核心代码为

```
<owl:Class rdf:ID = Emergency_Knowledge" / >
<owl:Class rdf:ID = " Nature_Calamity" / >
< rdfs: subClassOf rdf: resource = " # Emergency_Knowledge" / >
</owl:Class >
<owl:Class rdf:ID = " Floods_and_Droughts" / >
< rdfs: subClassOf rdf: resource = "# Nature_Calamity" / >
</owl:Class >
```

根据 OWL 的语义表达规则,子类与父类之间是具有传承性的. 也就是说,以上代码已经包含了水旱灾害,是应急知识分类的一种. 但为了更精确地定义应急知识资源以及其之间的关系,引入定义属性<sup>[8]</sup>. 一个属性是一个二元关系,它包括对象属性和数据属性. 2 种属性都是通过属性的域和属性的取值范围来对作用范围进行限制. 属性的域描述了该属性的主体可以是哪些类或类的实例,而属性的取值范围则描述了该属性的客体可以是哪些类或实例. 例如,为法律法规类建立一个名为《中华人民共和国防汛》的实例,并创建一个名为知识类别的属性,利用这一属性将《中华人民共和国防汛》归为水旱灾害类法律法规. 按照 OWL 的语法,核心代码为

```
<owl:ObjectProperty rdf:ID = "hasKnowledgeType" / >
< rdfs: domain rdf: resource = "#Emergency_Event" / >
```

```
< rdfs: range rdf: resource = "#Emergency_Knowledge" / >
</owl:ObjectProperty >
<owl:Class rdf:ID = "Law_And_Regulation" / >
< Law_And_Regulation rdf:ID = " Flood Control Regulations of the People's Republic of China" / >
< hasKnowledgeType rdf: resource = " # Flood _ And _ Drought" / >
</Law_And_Regulation >
```

### 3 基于 Ontology 的应急知识库的实现

Protégé 软件是斯坦福大学基于 Java 语言开发的本体编辑和知识表示软件,属于开放源代码软件. 这个软件主要用于语义网中本体的构建,是语义网中本体构建的核心开发工具.

本实验是在 CPU 主频 2.50 GHz 的条件下完成,采用 Protégé 软件最新的 4.2 版本作为构建应急知识库本体的实现工具并使用 OWL 进行描述,具体的实体知识表示如图 2 所示. 法律法规颁布时间 hasPublishtime 设定为 hasLaws\_and\_Regulations 的子属性,设定其定义域为 Law\_and\_Regulation,值域设定为数量上只有 1 个的 Planpublishtime 数值型属性,在对应的数值属性定义窗口将其设定为 dateTimeStamp 类型.

基于 Ontology 的应急知识库在 Protégé 软件中呈现层次化的结构分布,很好地完成了知识表示工作. 以这种方式不仅能够便于用户在构建知识库中能够清晰地了解应急知识库的结构设定以及资源的相关属性,而且便于用户在相应接口编程中的维护工作.

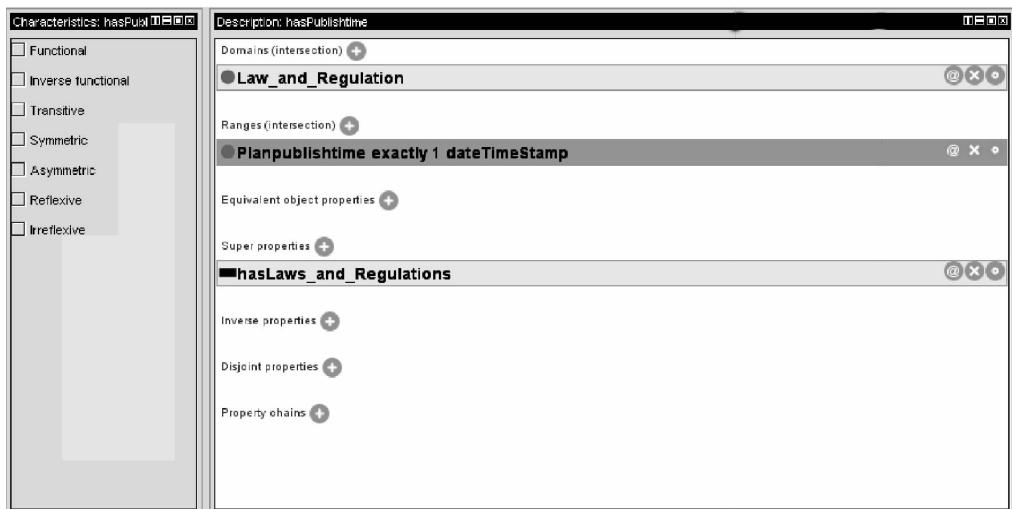


图 2 Law\_and\_Regulation 的实例与继承的匿名类

# 二维封闭空间声传播系统仿真建模与实现

冯媛, 蔡增玉, 甘勇, 李娜娜

(郑州轻工业学院 计算机与通信工程学院, 河南 郑州 450002)

**摘要:**针对声传播过程难以实际测量的问题,建立了基于麦克斯韦波动方程的二维封闭空间声波传播模型,并基于奈奎斯特抽样定理实现了波动方程离散化,在此基础上得到了二维封闭空间声传播的仿真算法,用 Matlab 进行了实现. 仿真结果表明本算法能够直观地显示声波在封闭空间传播情况,记录封闭空间声场内各点随时间的变化,便于实现对二维封闭空间声传播过程的观察和测量.

**关键词:**计算机仿真;声传播系统;封闭空间;中心差分方程

**中图分类号:**TP391.9 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2012.05.023

## Simulation modeling and implementation of two-dimensional enclosed space sound propagation system

FENG Yuan, CAI Zeng-yu, GAN Yong, LI Na-na

(College of Comp. and Com. Eng., Zhengzhou Univ. of Light Ind., Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** Aiming at the difficulty in actual measurement of sound propagation, the two-dimensional enclosed space model of sound propagation system based on Maxwell's wave equation was established, the wave equation was discretized using Nyquist theory. The simulation arithmetic of two-dimensional enclosed space sound propagation system was built and realized using Matlab. The results showed that it can intuitively show of sound in a enclosed space condition, record enclosed space acoustic field each point changing with time, and it is easy to realize for two-dimensional enclosed space sound propagation process observation and measurement.

**Key words:** computer simulation; sound propagation system; enclosed space; central difference equation

## 0 引言

声波无处不在,与人类息息相关.但在声传播系统工程和科研中,有些现象很难进行直接观察和测量,例如,人民大会堂后部的共振噪声,回音壁的声传播原理等.如果要对它们进行精确分析,就需要建立数学模型,由计算机实现仿真,找出问题的具体解决方法.因此,利用计算机仿真声场直观地

显示声场的特性,获得声场分布的有效结果,在建筑设计、海声学、汽车设计和超声检测等很多领域都有应用<sup>[1-4]</sup>.已有声传播仿真的研究主要集中在水声、噪声、管道环境和粮食介质等特定环境,而关于最为基本和典型的二维封闭空间声传播系统的研究很少,且已有的仿真模型十分复杂,实现起来比较困难.本文将通过一个具体的二维封闭空间声传播系统的仿真设计和实现,来说明建立实际的声

收稿日期:2012-08-05

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAK01A38);河南省2010年基础与前沿技术研究计划项目(102300410110)

作者简介:冯媛(1978—),女,河南省平顶山市人,郑州轻工业学院讲师,主要研究方向为计算机仿真、数字信号处理.

传播仿真系统的过程.

# 1 二维封闭空间声波传播数学模型

## 1.1 问题分析

当声音在空气中传播时,会引起空气分子的振动,使空气分子产生位移<sup>[5]</sup>. 本文将研究在空间中任一点上空气分子随时间变化的振动状态.

由麦克斯韦波动方程可知,要研究上述问题,只需要研究任一点上空气分子的位移  $u(x,y,z,t)$  或速度  $v(x,y,z,t)$  或加速度  $a(x,y,z,t)$  或压力  $P(x,y,z,t)$  中的 1 个量即可,其中  $x,y,z$  表示三维空间坐标, $t$  表示时间.

## 1.2 数学模型

假设在一个封闭的矩形空间中,空间内部全是空气,无其他介质,而边界对声音产生全反射,即当声波碰到边界时,被全部反弹回去,不被边界吸收,没有能量衰减,且只有一个声源,如图 1 所示.

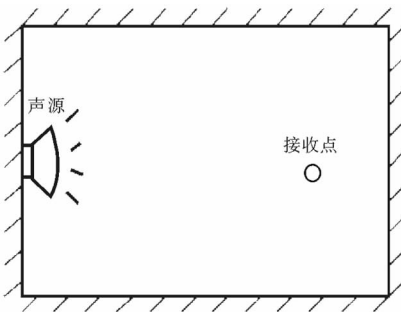


图 1 封闭矩形空间的声传播系统模型

这里,空间区域为  $\Omega:0 \leq x \leq X, 0 \leq z \leq Z$ ,时间区域为  $\tau:0 \leq \tau \leq T$ . 接收点接收到的信号是从多个方向传播过来的声波共同作用的结果(除直线传来的声波外,还有从边界反弹过来的声波). 根据麦克斯韦的波动方程(在此只考虑二维的情况),有

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0 \tag{1}$$

其中, $v$  表示声波在介质中的传播速度,介质不同,该速度取不同的值. 环境对声音传播的影响就体现在对  $v$  的影响上.

在该空间区域内的声速为  $v(x,z), x,z \in \Omega$ ,且

$$\frac{\partial v}{\partial t} = 0 \tag{2}$$

假设声源的坐标为  $(x_0, z_0)$ , 在  $t$  时刻发出一个冲激,即  $u(x_0, z_0, t) = \delta(t)$ . 因为当采用冲激信号

时,它的频带宽度为无穷大,冲激响应可以得到系统完整的频域特性,相当于包括了所有的声源性质,并且不失一般性.

当声波传播过程中碰到边界壁时,声波被全反射,即边界条件为

$$u(0, z, t) = u(X, z, t) = u(x, 0, t) = u(x, Z, t) = 0 \tag{3}$$

这样,可得所要研究模型的数学方程式

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0 \\ u(x_0, z_0, t) = \delta(t) \\ u(0, z, t) = u(X, z, t) = u(x, 0, t) = u(x, Z, t) = 0 \end{cases} \tag{4}$$

# 2 二维封闭空间声波传播仿真算法

## 2.1 波动方程离散化

式①—④都为连续时间和空间的方程,由于在计算机中只能进行离散数学运算,所以应将连续方程离散化,使之能在计算机中运行. 根据奈奎斯特抽样定理,只要取样点足够密,就可以把连续空间中未被取样的其他点的状态完全恢复出来,即在满足奈奎斯特抽样定理的条件下,可用一个离散化的方程来等价代换与之对应的连续方程<sup>[6]</sup>. 波动方程的离散化分为下面 4 个步骤.

1) 用  $\delta$  作空间分割,用  $\Delta$  作时间分割,并且定义  $\frac{X}{\delta} = M, \frac{Z}{\delta} = N, \frac{T}{\Delta} = L$ .

由此可得与原连续空间区域  $\Omega$  相对应的离散的空间区域  $\tilde{\Omega} = \{i\delta, j\delta\}$  和离散的时间区域  $\tilde{\tau} = \{k\Delta\}$ ,从而在这个空间上的速度  $v$  及声场  $u$  变为:  
 $v(x,z) \Rightarrow v(i\delta, j\delta), u(x,z,t) \Rightarrow u(i\delta, j\delta, k\Delta)$ , 其中  $i = 0, 1, \dots, M, j = 0, 1, \dots, N, k = 0, 1, \dots, L$ . 可将速度及声场简化表示为  $v_{ij}$  和  $u_{ijk}$ .

2) 二阶导数的二阶中心差分公式可以表示为

$$f''(x) = \frac{1}{\delta^2} [f(x+\delta) - 2f(x) + f(x-\delta)] + o(\delta^2) \tag{5}$$

其中  $o(\delta^2)$  表示  $f(x)$  的高阶无穷小.

3) 可以由式④和⑤得到表达式

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \Rightarrow \frac{u_{ij(k+1)} - 2u_{ijk} + u_{ij(k-1)}}{\Delta^2} \\ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \Rightarrow \frac{u_{(i+1)jk} - 2u_{ijk} + u_{(i-1)jk}}{\delta^2} \\ \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \Rightarrow \frac{u_{i(j+1)k} - 2u_{ijk} + u_{i(j-1)k}}{\delta^2} \end{cases} \tag{6}$$

4)将式⑥代入波动方程①式中,得到离散化的波动方程式

$$u_{ij(k+1)} = 2u_{ijk} - u_{ij(k-1)} + v^2 \Delta^2 \left[ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] =$$

$$2u_{ijk} - u_{ij(k-1)} + \frac{v^2 \Delta^2}{\delta^2} [u_{(i+1)jk} - 2u_{ijk} +$$

$$u_{(i-1)jk} + u_{i(j+1)k} - 2u_{ijk} + u_{i(j-1)k}] + o(\Delta^2, \delta^2) \quad (7)$$

其中,  $i = 1, 2, \dots, M - 1; j = 1, 2, \dots, N - 1; k = 1, 2, \dots, L - 1$ .

该公式的物理意义为:可以用一个位置点过去的状态、现在的状态和与它相邻的4个位置点现在的状态来推导该位置点将来的状态。

同理,得出离散化的初始条件和边界条件:

初始条件

$$u_{ijk} = \begin{cases} 1 & k = 1, i = i_s, j = j_s \\ 0 & k = 1, (i, j) \neq (i_s, j_s) \\ 0 & k = 0 \end{cases} \quad (8)$$

边界条件

$$u_{0jk} = u_{Mjk} = u_{i0k} = u_{iNk} = 0$$

### 2.2 仿真算法

根据上述数学模型的分析以及得到的离散化的方程式,在计算机上进行二维封闭空间内声传播仿真,其算法的具体步骤为:

- 1)对模型参数赋值,如声传播速度为 330 m/s,令  $v_{ij} = 330$ ,其中  $i = 0, 1, \dots, M; j = 0, 1, \dots, N$ .
- 2)声波位移场赋初值⑧.
- 3)对声波场位移作递推计算,即用过去与当前值计算下一时刻的值(式⑦).
- 4)采样,即每做完步骤3)的计算后,对声波场位移值记一次盘  $u_{ijk}$ .
- 5)令  $k$  变为  $k + 1$ ,重复步骤3)和4),直到  $k = L$  为止.

### 3 实验结果与分析

本文利用 Matlab 仿真二维封闭空间环境,设  $\nu = 330$  m/s,  $\lambda = 0.33$  m. 根据抽样定理空间抽样间隔为  $\delta = 0.165$  m;根据系统仿真要求,时间抽样间隔为  $\Delta = 0.0002$  s.

仿真时设离散的空间区域  $M = 50, N = 50$ ,并设声源的坐标为  $(i_s, j_s) = (1, 1)$ ,声源在时刻  $k = 1$  时发出一个冲激.图2至图5依次给出了  $k = 50, k =$

$120, k = 140, k = 1000$ 时通过计算机仿真得到的二维封闭空间中各点的振动状态.

声传播初期,取  $k = 50$  时各点的振动状态如图2所示;声波恰好传到密闭空间边界,即  $k = 120$  时各点振动状态如图3所示;声波发生全反射后,取  $k = 140$  时各点振动状态如图4所示;当观察时刻接

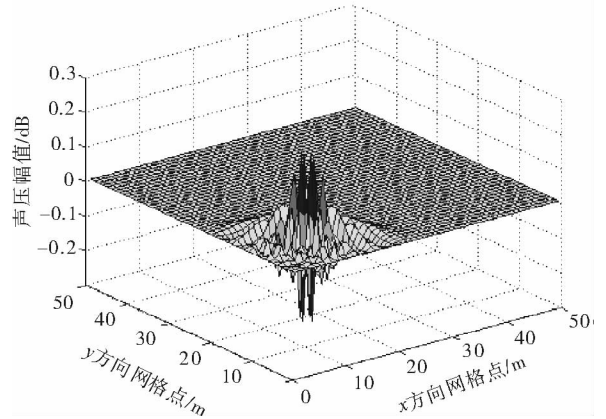


图2  $k = 50$  时仿真波形

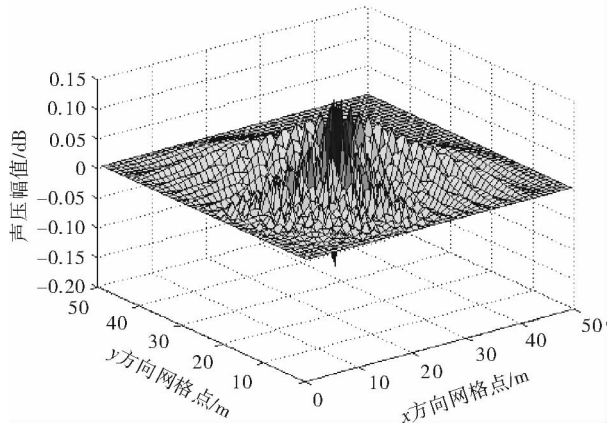


图3  $k = 120$  时仿真波形

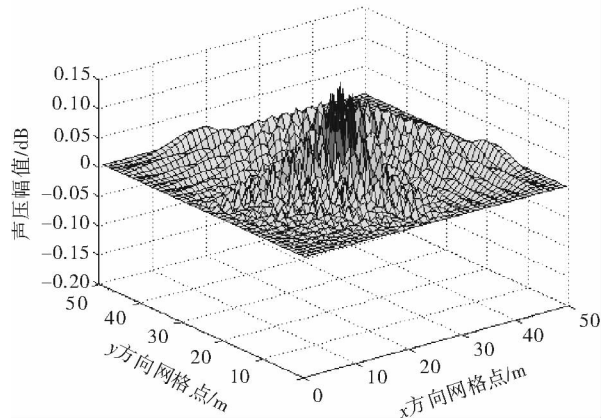


图4  $k = 140$  时仿真波形

近无穷时,这里取  $k = 1\ 000$  各点的振动状态如图 5 所示,说明了当观察时刻趋于无穷时,封闭空间各点的振动趋于稳定.为了观察更清晰,图 6 给出了  $k = 140$ ,即声波传播发生全反射后的仿真波形的侧视图,可以清楚地看到波形反射并叠加后的效果.

仿真结果表明,本文实现的二维封闭空间仿真

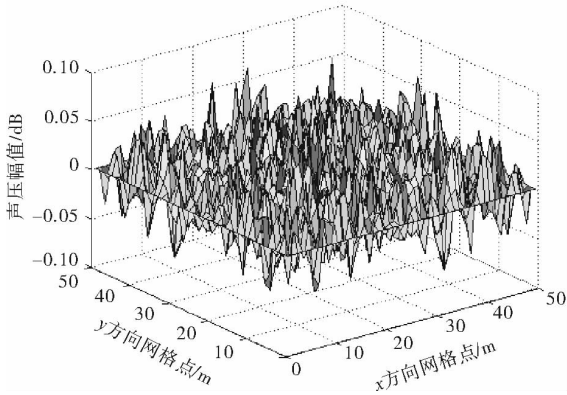


图 5  $k = 1\ 000$  时仿真波形

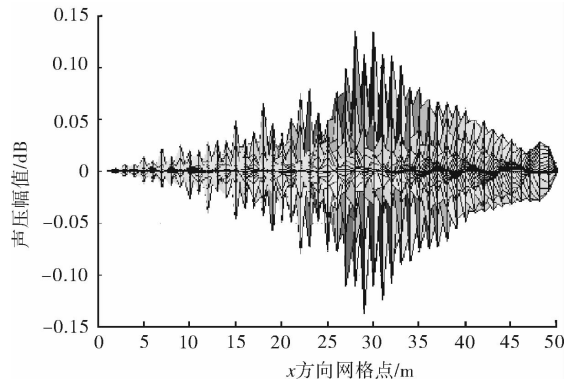


图 6  $k = 140$  时的仿真波形侧视图

系统能够直观地显示声波在封闭空间传播情况,记录封闭空间声场内各点随时间的变化,便于实现对二维封闭空间声传播过程的观察和测量.

## 4 结语

本文通过分析声波在封闭空间中的传播特性,建立了基于麦克斯韦波动方程的二维封闭空间声波传播模型,并通过抽样实现了模型的离散化,在此基础上得到了二维封闭空间声传播的仿真算法.本文的研究表明,对于大多数的声波传播问题,可参照上述建模过程和算法进行计算机仿真模拟,得到实际问题空间点的振动状态,而且运行仿真速度较快.

### 参考文献:

- [1] 谭同德,史晓菲,赵新灿,等.基于声线跟踪法的室外声场仿真[J].计算机工程与应用,2010,46(14):241.
- [2] 卢晓亭,张林.水声传播建模研究现状综述[J].海洋技术,2010,29(4):48.
- [3] 王彬星,郑四发,周林,等.驾驶室声场响应面仿真模型的构建及应用[J].噪声与振动控制,2011(6):60.
- [4] 樊振军,张吉堂.三维超声波声场建模仿真在无损检测中的应用[J].煤矿机械,2011,32(7):257.
- [5] Rabenstein R,Zayati A. Sound field simulation by computational acoustics(Part I): Simulation algorithm[J]. Int J of Adaptive Control and Signal Proc,2000(14):663.
- [6] Berezovski A,Engelbrecht J,Maugin G A. Numerical simulation of two-dimensional wave propagation in functionally graded materials[J]. European J of Mechanics A/Solids,2003,22:257.

(上接第 94 页)

## 4 结论

本文通过对 Ontology 模型及其描述语言 RDF/OWL 进行深入研究,给出了基于 Ontology 的应急知识库的知识表示,并应用 Protégé 编辑工具对其进行了仿真实验.结果表明,应急知识库本体的构建能够很好地满足应急知识库中知识表达的需求,而且扩展性佳、易于维护,能够实现知识实体间关系属性的科学完备的知识表示.

### 参考文献:

- [1] 刘征,鲁娜.基于问题方案共进模型的设计知识获取方法[J].中国机械工程,2011,22(10):1207.
- [2] 姚金国,代志龙.基于文本分析的知识获取系统设计

与实现[J].计算机工程,2011,37(2):157.

- [3] 肖甜,宋磊,余曙光,等.基于本体的高速公路应急预案知识库系统构建[J].产业与科技论坛,2011,10(5):71.
- [4] 钟秀琴,符红光,余莉,等.基于本体的几何学知识获取及知识表示[J].计算机学报,2009,33(1):167.
- [5] Uschold M,Grüniger M. Ontologies: principles, methods and application[J]. The Knowledge Eng Review,1996,11(2):93.
- [6] 钟秀琴,刘忠,丁盘苹.基于混合推理的知识库的构建及其应用研究[J].计算机学报,2012,35(4):761.
- [7] Zhou X,Wu Z,Yin A,et al. Ontology development for unified traditional Chinese medical language system[J]. Artificial Intelligence in Medicine,2004,32(1):15.
- [8] He Q,Ling T W. An ontology based approach to the integration of entity-relationship schemas[J]. Data & Knowledge Eng,2006,58(3):299.

# 高速移动信道中的 OFDM 载波频偏估计

陈东华

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

**摘要:**为了提高时变信道中 OFDM 载波频偏的估计性能,在相邻符号之间插入短时重复训练序列进行载波频偏估计,进而通过缩短相关间隔来降低信道时变对载波频偏估计的影响.仿真结果表明,当时变信道归一化多普勒频率大于 0.1 时,短时序列估计方法的性能优于传统循环前缀方法;而当信道变化加快时,短时序列估计方法的性能优势更加明显,更适宜高速移动环境中的载波频偏估计.

**关键词:**正交频分复用;载波频偏估计;时变信道

**中图分类号:**TN911 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2012.05.024

## Carrier frequency offset estimation for OFDM in highly mobile channels

CHEN Dong-hua

(College of Infor. Sci. and Eng., Huaqiao Univ., Xiamen 361021, China)

**Abstract:** In order to improve the estimation performance of carrier frequency offset (CFO) for OFDM systems in time-varying channel, the short repetitive training sequences were inserted between any two OFDM symbols and then were used to estimate the CFO. The impact of time-varying channel on the estimation of CFO was thus reduced by decreasing the correlation interval. Simulation results showed that when the normalized Doppler frequency of time-varying channel was above 0.1, the short training sequence based method was superior in performance to the conventional cyclic prefix based one, especially so when the channel varies faster, and thus was more applicable in high mobility environments.

**Key words:** orthogonal frequency division multiplexing (OFDM); carrier frequency offset estimation; time varying channel

## 0 引言

随着无线通信的快速发展,信息传输速率的增加与可用频谱资源的稀缺之间的矛盾日益凸显<sup>[1]</sup>. 为了实现高速的信息传输,高效传输技术受到越来越多的关注. 正交频分复用 (OFDM) 利用子载波间正交性提高频谱利用效率,是一种频谱有效的传输

技术<sup>[2]</sup>;同时,该技术分别使用了快速傅里叶正变换和逆变换 (FFT/IFFT) 实现信号的发射和接收,是一种可实时实现的传输方案. 经过多年的研究,学术界和产业界已经把 OFDM 作为多种移动通信标准的物理层传输方案<sup>[3]</sup>,如无线局域网标准 IEEE802.11a,无线广域网标准 WiMAX 和第四代蜂窝移动网标准 LTE-A 等.

收稿日期:2012-07-10

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助(11QZR02);福建省自然科学基金项目(2012J05119);广西无线宽带通信与信号处理重点实验室 2011 年度主任基金项目(21104);华侨大学科研基金资助项目(12BS222)

作者简介:陈东华(1977—),男,安徽省濉溪县人,华侨大学讲师,博士,主要研究方向为宽带移动通信.



OFDM 技术之所以具有诸多优点,其根本原因在于 OFDM 子信道之间具有正交性.然而在实际的通信过程中,收发信机之间的载波震荡频率将会出现偏差,称为载波频偏(CFO).即使标称频率相同,通常也会存在 0.000 01% ~ 0.000 1% 的偏差,这种偏差将会破坏 OFDM 子信道之间的正交性.由移动台移动导致的收发信机之间的位置变化也会产生 CFO,不仅如此,移动台移动还会产生信道随时间的变化,从而产生时间选择性衰落<sup>[4]</sup>.

为了补偿 CFO,接收机必须获得 CFO 的精确估计.针对 OFDM 系统的 CFO 估计,目前已有大量文献研究. CFO 估计技术可分为时域方法和频域方法 2 大类,前者在接收机对接收信号 FFT 之前进行,而后者在接收机 FFT 之后进行.时域估计方法主要用于分数倍频偏估计,而频域估计方法主要用于整数倍频偏估计,分数倍频偏的估计更具挑战性.采用循环前缀(CP)<sup>[5-6]</sup>和重复时隙(RS)<sup>[7-8]</sup>估计 CFO 是 2 种较为常见的时域 CFO 估计方法,这类方法均是基于相关原理的思想.由于相关运算计算简单,此类估计方法在实际系统中应用广泛.现有基于相关原理的 CFO 估计均是在静态信道环境条件下进行的,时变信道环境中基于相关原理的 CFO 估计性能目前还未见报道.因此本文拟探讨这种情况下的 CFO 估计问题,研究适用于信道时变并采用相关原理的 CFO 估计方法.

## 1 OFDM 系统模型

发射机首先根据调制方式把待传输比特流映射为频域调制符号  $X(k)$ ,不失一般性,本文采用 QPSK 调制方式,频域调制符号再经过串并转换后送入 IFFT 模块进行 OFDM 调制. OFDM 调制后的时域信号输出为

$$x(n) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) \exp(j2\pi kn/N) \quad n = 0, 1, \dots, N-1$$

其中,  $N$  和  $X(k)$  分别为以子载波数计的符号长度和第  $k$  个子载波数据.为了克服信道频率选择性,时域信号序列  $\{x(n), n = 0, 1, \dots, N-1\}$  在增加长度为  $G$  的循环前缀(如图 1 所示)后送入信道中传输.

在接收端,接收机接收到的时域信号可表示为

$$r(n) = e^{j2\pi n\epsilon} \sum_{l=0}^{L-1} h(n, l) x(n-l) + w(n)$$

$$n = -G, \dots, N-1 \quad (1)$$

其中,  $\epsilon$  为收发信机之间的 CFO,  $h(n, l)$  为  $n$  时刻第  $l$  条传输路径对应的信道脉冲响应(CIR),  $L$  为最大信道传输路径数,  $w(n)$  是均值为零、方差为  $\sigma^2$  的加性高斯白噪声(AWGN).在静态信道环境中  $h(n, l) = h(l), n = -G, \dots, N-1$ , 此时 (1) 式变为

$$r(n) = e^{j2\pi n\epsilon} \sum_{l=0}^{L-1} h(l) x(n-l) + w(n) \quad (2)$$

为了解调接收信号,接收机需要补偿载波频偏,为此需首先得到 CFO 的估计.

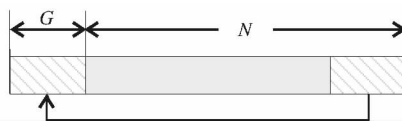


图 1 OFDM 符号格式

## 2 时域 CFO 估计方法

### 2.1 基于 CP 的 CFO 估计

由 (1) 式或 (2) 式,载波频偏  $\epsilon$  使得接收信号产生  $2\pi n\epsilon/N$  的相位旋转,这也正是基于 CP 的 CFO 估计的出发点.具体来说,长度为  $G$  的循环前缀和有效符号最后  $G$  个对应样值之间的相位差包含了 CFO 的信息,通过提取该相位差进而达到估计 CFO 的目的.由图 1 可知,循环前缀样值是有效符号最后  $G$  个样值的复制,在静态信道假设下,再由 (2) 式,有效符号最后  $G$  个样值对应的接收信号与 CP 对应的接收信号之间的数学关系式为

$$r(n+N) = e^{j2\pi n\epsilon} r(n) = e^{j2\pi\epsilon} r(n) \quad n = -G, \dots, N-1 \quad (3)$$

由 (3) 式不难看出,有效符号最后  $G$  个接收样值相对于 CP 接收样值产生了  $2\pi\epsilon$  的相位差,如果能够提取该相位差,即可得到  $\epsilon$  的估计.为了提取该相位差,对 2 个部分接收信号对应样值做相关运算可得

$$R_{n, n+N} = \sum_{n=-G+L}^{-1} r^*(n) r(n+N) = A e^{j2\pi\epsilon} \quad (4)$$

其中,  $A$  为与相位无关的正实数,且可表示为

$$A = \sum_{n=-G+L}^{-1} r^*(n) r(n) = \sum_{n=-G+L}^{-1} |r(n)|^2$$

对 (4) 式两边取反正切函数并取主值得 CFO 的估计为

$$\epsilon = \arg\{R_{n, n+N}\}$$

相关运算即 (4) 式舍去了 CP 的最初  $L$  个样值,这

是为了避免因多径信道引入的前一个符号对当前符号 CP 的干扰。

有效符号最后  $G$  个样值对应的接收信号与 CP 对应的接收信号之间的关系式 (3) 是在静态信道假设下得到的,然而在时变信道下,该关系式不再成立,此时基于 CP 的 CFO 估计算法的性能将会严重恶化.为了降低信道时变的影响,利用短时训练序列来估计 CFO,从而达到提高时变信道中 CFO 的估计精度的目的。

## 2.2 基于短时训练序列的 CFO 估计

RS 估计方法是另一类 CFO 估计方法,它把 OFDM 符号分割成若干个重复的短时段,通过重复的短时段之间的相关运算来估计 CFO. RS 方法最初应用于扩展 CFO 的估计范围,受 RS 方法的启发,本文将短时重复序列应用于时变信道的 CFO 估计。

基于短时重复序列的信号传输结构如图 2 所示,  $M$  个 OFDM 连续符号组成一个传输帧,在连续 2 个符号之间插入短时训练序列,短序列由 2 部分长度为  $P$  的相同序列通过复制而构成,且短序列的长度  $2P = N$ . 在移动应用环境中,由于信道随时间是缓慢渐变的随机过程,因此短时间观察范围内,信道响应值近似相等或可认为信道是时不变的;在较长观察范围内,信道响应的变化非常剧烈,此时不可假设信道时长不变.具体到 CFO 估计问题,由于短序列长度  $2P$  很小,因此在短序列持续时间间隔内,信道响应可近似认为是不变的,从而相对于基于 CP 的较长观察时间范围而言可望获得较好的 CFO 估计性能。

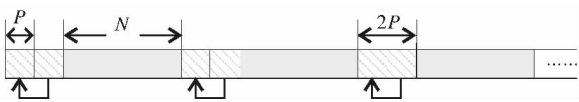


图 2 OFDM 传输帧格式

RS 估计方法是在 OFDM 符号内进行序列的重复,即整个 OFDM 符号都为训练序列,而本文是独立于 OFDM 符号的短训练序列,因此从训练开销上来说本文序列更有优势。

基于短序列的 CFO 估计算法推导:假设前半段短序列接收信号为  $\{y(n), n = 0, 1, \dots, P-1\}$ , 则后半段接收序列可表示为

$$y(n+P) = e^{j2\pi\epsilon n} y(n) \quad n = 0, 1, \dots, P-1$$

利用与 2.1 节相同的方法可得 CFO 的估计为

$$\hat{\epsilon} = \frac{N}{2\pi P} \arg \left\{ \sum_{n=L}^{P-1} y^*(n) y(n+P) \right\} \quad (5)$$

为了降低单个短序列 CFO 估计误差,将各个短序列对应的 CFO 估计出来之后,再对这些 CFO 估计值进行平均,从而减小单个序列 CFO 估计值的随机偏差。

## 3 仿真分析

为了衡量时变信道环境中 2 种方法的估计性能,对上述 2 种算法进行了系统仿真研究. 仿真参数: OFDM 符号含有 256 个调制复符号,即  $N = 256$ ; 循环前缀包含 16 个样值,即  $G = 16$ ; 系统采用 QPSK 调制,短时训练块的长度参数  $P = 16$ ; 多径信道由 4 条独立衰落的等增益时变路径组成,每径的时变抽头按 Jakes 模型产生;信道变化快慢用归一化多普勒频率(多普勒频率对 OFDM 子载波间隔归一化)<sup>[4]</sup> 来表示,记为  $f_d$ ,归一化多普勒频率越大则信道变化越快,反之则越慢,  $f_d = 0$  时信道不随时间变化。

图 3 比较了在 2 种信噪比 (SNR) 条件下 2 种 CFO 估计方法的均方误差 (MSE) 随  $f_d$  变化的性能曲线. 由图 3 可以看出,随着归一化多普勒频率的增加,信道时变逐渐加快,基于循环前缀估计方法的 MSE 急剧增加,性能恶化严重,而采用短序列方法的 MSE 变化缓慢,在所考虑的多普勒频率范围内基本保持不变. 这是由于循环前缀方法的观察时间间隔为 OFDM 符号长度  $N$ ,短序列方法的观察时间间隔为  $P$ ,而  $P \ll N$ ,所以短序列方法中信道响应时变的影响较小,而循环前缀方法中信道响应时变的影响较为严重。

图 4 仿真了固定归一化多普勒频率时 2 种方法的 MSE 性能随 SNR 变化的关系曲线. 由图 4 可知,在信道变化较快时,基于循环前缀方法的 MSE 随 SNR 基本保持不变,这说明信道变化导致的误差对 CFO 估计造成的影响远远超过噪声对 CFO 估计的影响,即信道时变对循环前缀方法的影响非常严重. 同时可以看到,在高 SNR 区域和在相同的多普勒频率时,短序列方法的 MSE 性能均优于循环前缀方法,例如,在信噪比为 40 dB、时变信道归一化多普勒频率为 0.3 时,前后 2 种方法的估计 MSE 分别为 0.002 3 和 0.1,这进一步证实了之前的分析。

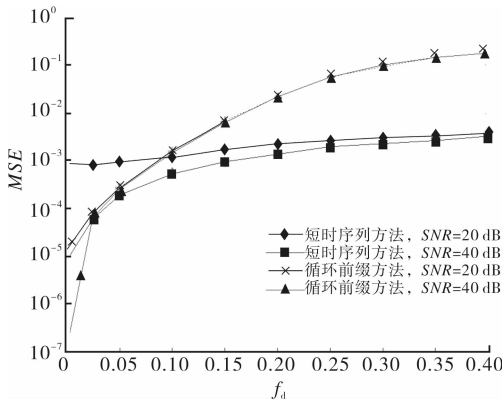


图3 MSE 随 f<sub>d</sub> 变化的性能曲线

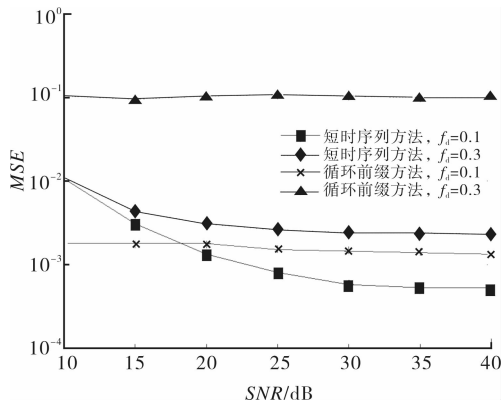


图4 MSE 性能随 SNR 变化的关系曲线

另一方面,图3和图4仿真结果都显示,在低SNR区域和小多普勒频率条件下,循环前缀方法要优于短时序列方法,这是由于小多普勒频率对应信道变化非常缓慢的情况.当多普勒频率为0时,信道在所有观察长度范围内都不随时间变化,因此信道时变对2种方法的影响都很小,这种情况下循环前缀方法之所以优于短时序列方法,要归结为短时序列方法的噪声放大效应.由⑤式可知,短时训练方法的CFO估计值比循环前缀估计方法多了一个放大因子N/P,该放大因子放大了噪声影响,因此在信道变化极为缓慢或时不变信道条件下,短时训练方法的性能要低于循环前缀方法的性能.为了验证这一结论,图5仿真了在多普勒频率为0(即静态信道)时2种估计方法的MSE性能,图中结果明显地证明了前述观点.

### 4 结论

研究了采用短时重复训练序列进行载波频偏估

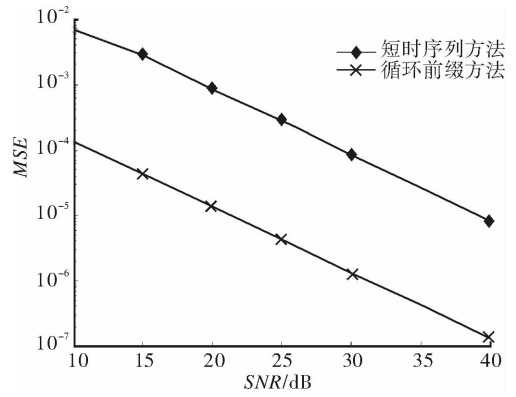


图5 静态信道时的 MSE 性能

计的方法,该方法通过减小相关间隔来降低信道时变对载波频偏估计的影响.研究表明,尽管在静态信道条件下循环前缀方法的性能优于短时序列方法的性能,然而在高速移动环境中,后者却比前者有显著的性能优势,这说明短时序列方法在时变信道CFO的估计中是行之有效的.

### 参考文献:

- [1] Badoi C I, Prasad N, Croitoru V, et al. 5G based on cognitive radio[J]. Wireless Personal Com, 2011, 57(3): 441.
- [2] Zhou X, Fang Y, Wang M. Compressed sensing based channel estimation for fast fading OFDM systems[J]. J of Syst Eng and Electr, 2010, 21(4): 550.
- [3] 朱颜锐, 田斌, 安全坤, 等. 一种快速 OFDM 调制信号识别算法[J]. 西安电子科技大学学报, 2012, 39(1): 17.
- [4] Gupta P, Mehra D K. A novel technique for channel estimation and equalization for high mobility OFDM systems [J]. Wireless Personal Com, 2009, 49(4): 613.
- [5] Lashkarian N, Kiaei S. Class of cyclic-based estimators for frequency-offset estimation of OFDM systems [J]. IEEE Trans on Com, 2000, 48(12): 2139.
- [6] Tsai Y R, Li X S, Wei C Y. Data-carrier aided carrier frequency offset estimation for OFDM systems [C]//IEEE Vehicular Techn Conf, [s. n.]: IEEE Press, 2008: 898-902.
- [7] Morelli M, Mengali M. An improved frequency offset estimator for OFDM applications [J]. IEEE Com Letters, 1999, 3(3): 75.
- [8] Ghogho M, Ciblat P, Swami A, et al. Training design for repetitive-slot-based CFO estimation in OFDM [J]. IEEE Trans on Signal Proce, 2009, 57(12): 4958