第 38 卷 第 2 期 计 算 机 工 程 2012 年 1 月
Vol.38 No.2 Computer Engineering January 2012

·人工智能及识别技术· 文章编号：1000—3428(2012)02—0156—03 文献标识码：A 中图分类号：TP18

覆盖广义粗糙集中近似集增量更新方法研究

刘永文，李天瑞，陈红梅，高子喆，谷小广

(西南交通大学信息科学与技术学院，成都 610031)

摘 要： 研究覆盖广义粗糙集中近似集变化的增量更新问题，分析属性增删时覆盖广义粗糙集模型近似集的性质，根据边界域与近似集关系，得出属性集变化时近似集的变化趋势，并在此基础上，提出一种属性集变化时近似集的动态增量更新方法。通过实例验证该方法的有效性。

关键词： 粗糙集；知识发现；属性集；增量更新；近似集

Research on Approximate Set Incremental Updating Method in Covering Generalized Rough Set

LIU Yong-wen, LI Tian-rui, CHEN Hong-mei, GAO Zi-zhe, GU Xiao-guang

(School of Information Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

【Abstract】 This paper researches the variation of approximate set in covering generalized rough set when the attribute set changes, through analyzing the approximate set properties and discussing the relation between boundary and approximate set when the attribute set varies with time, it concludes the variation trend of the approximate set, on the basis of this, the paper proposes an method for updating approximate set incrementally. Examples show the validity of the proposed method.

【Key words】 rough set; knowledge discovery; attribute set; incremental updating; approximate set

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2012.02.051

1 概述

文献[1]提出的粗糙集理论可以处理不确定和不精确性问题，在知识发现、机器学习、决策分析等方面得到了日益广泛的应用。为了适应实际应用的需求，许多研究者提出了各种推广的粗糙集模型。如文献[2]提出了覆盖粗糙集模型，并给出了其基本概念及相关性质。文献[3-4]给出了覆盖粗糙集中约简的概念和方法及相关概念之间的联系。文献[5]讨论了覆盖粗糙集上近似的定义方法，提出了覆盖粗糙集最小上近似的概念等。另一方面，人们在基于经典粗糙集及不同的扩展粗糙集模型下的动态知识更新方面做了大量的工作，如文献[6]实现了多个属性同时增删粗糙集模型中近似集的增量式更新方法和规则提取方法，并讨论了属性值变化下经典粗糙集和优势关系粗糙集模型下近似集的动态更新[7-8]。为了进一步完善基于覆盖广义粗糙集的理论体系，使其能够更好地应用于实际的需求，本文在已有理论体系的基础上，分析对象的邻域(对象的最小描述的交集)、边界域与近似集的关系，讨论了覆盖粗糙集模型中近似集的增量更新方法。

2 基本概念

定义 1 设 U 是一有限非空论域，C 是 U 上的一个子集族，若 $\varnothing \notin C$ 且，则称 C 为论域 U 的一个覆盖，称元组 $<U,C>$ 为覆盖近似空间[2]。

定义 2 设 $<U,C>$ 为覆盖近似空间，$x \in U$，则定义 x 关于 $<U,C>$ 的最小描述为[2]：

$$md(x)=\{K \in C : x \in K \wedge \forall S \in C \wedge (x \in S \wedge S \subseteq K \Rightarrow K=S)\}$$

定义 3 设 $<U,C>$ 为覆盖近似空间，对任意 $x \in U$，$N(x)=\bigcap\{K \in C; x \in K\}$，称为 x 的邻域[2]。

结合定义 2 和定义 3，容易得到 $N(x)=\bigcap md(x)$。

定义 4 设 U 是一有限非空论域，C 是 U 上的一个覆盖，对于任意的 $X \subseteq U$，X 关于覆盖近似空间 $<U,C>$ 的下近似 $\underline{C}(X)$ 和上近似 $\overline{C}(X)$ 分别定义为[2]：

$$\underline{C}(X)=\{x \in U \mid N(x) \subseteq X\},\ \overline{C}(X)=\{x \in U \mid N(x) \cap X \neq \varnothing\}$$

X 关于近似空间 $<U,C>$ 的正域 $pos_C(X)$、负域和边界域 $bn_C(X)$ 分别定义为：$pos_C(X)=\underline{C}(X)$，$neg_C(X)=\sim\overline{C}(X)$，$bn_C(X)=\overline{C}(X)-\underline{C}(X)$。

当 $\overline{C}(X)=\underline{C}(X)$ 时，称 X 关于近似空间 $<U,C>$ 可定义的，否则称为粗糙的。

定义 5 设覆盖近似空间 $<U,C>$，U 是一有限非空论域，C 是由属性集 B 生成的覆盖元所构成的 U 上的一个子覆盖，对于任意的 $X \subseteq U$，$x \in X$ 关于属性集 B 的邻域为：

$$N_B(x)=\bigcap\{K \in C; x \in K\}$$

定义 6 设覆盖近似空间 $<U,C>$，U 是一有限非空论域，C 是由属性集 B 生成的覆盖元所构成的 U 上的一个子覆盖，对于任意的 $X \subseteq U$，X 关于属性集 B 的下近似集、上近似集、下边界和上边界分别定义为：

$$\underline{C_B}(X)=\{x \in U \mid N_B(x) \subseteq X\}$$

$$\overline{C_B}(X)=\{x \in U \mid N_B(x) \cap X \neq \varnothing\}$$

$$\underline{\Delta}_{C_B}(X)=X-\underline{C_B}(X),\ \overline{\Delta}_{C_B}(X)=\overline{C_B}(X)-X$$

基金项目： 国家自然科学基金资助项目“基于粒计算的动态知识发现中若干关键问题研究”(60873108)

作者简介： 刘永文(1979－)，女，硕士研究生，主研方向：智能信息处理；李天瑞，教授、博士生导师；陈红梅，讲师、博士；高子喆、谷小广，硕士研究生

收稿日期： 2011-04-29 **E-mail：** lywwqe@163.com

X 关于属性集 B 的正域 $pos_{C_B}(X)$，负域 $neg_{C_B}(X)$ 和边界域 $bn_{C_B}(X)$ 分别定义为：

$pos_{C_B}(X)=\underline{C_B}(X)$

$neg_{C_B}(X)=\sim\overline{C_B}(X)$

$bn_{C_B}(X)=\overline{C_B}(X)-\underline{C_B}(X)$

3 属性集变化时覆盖粗糙集中近似集的性质分析

在覆盖粗糙集中，一个覆盖表示知识库中的某种知识，覆盖元代表知识粒，覆盖生成的集合逼近则代表基于知识库对某事物的刻画和描述。在信息系统中，根据对象的属性值生成覆盖元，所有的属性生成的覆盖元放在一起，构成论域 U 上的一个覆盖，属性集元素个数越多，则覆盖元个数越多，由覆盖生成的集合逼近则对某事物的刻画和描述越精确。当属性集变化时，由属性构成的覆盖发生变化，近而影响到给定集合的上、下近似集及边界域的变化。下面为属性集变化时对覆盖粗糙集中近似集性质进行的分析。

引理 设 $<U,C>$ 是一个覆盖近似空间，即 U 是一个非空有限集合。A 是 U 的属性集，对于 $\forall x\in U$，$P=\{\alpha_1,\alpha_2,\cdots,\alpha_n\}\subseteq A$，则：$C_P=\{K_{\alpha_1 1},K_{\alpha_1 2},\cdots,K_{\alpha_1 m_1},\cdots K_{\alpha_i 1},K_{\alpha_i 2},\cdots,K_{\alpha_i m_i},\cdots,K_{\alpha_n 1},K_{\alpha_n 2},\cdots,K_{\alpha_n m_n}\}$ 构成的 U 一个覆盖，向属性集 P 添加一个属性 a，$C_{\{a\}}=\{K_{a1},K_{a2},\cdots,K_{as}\}$，则 $C_{P\cup\{a\}}=C_P\cup C_{\{a\}}$ 仍是 U 的一个覆盖。此时有 $N_P(x)\supseteq N_{P\cup\{a\}}(x)$，且有 $N_{P\cup\{a\}}(x)=N_P(x)\cap N_{\{a\}}(x)$。相反，若从 P 中删除一个属性，则覆盖元减少，即 $N_P(x)\subseteq N_{P-\{a\}}(x)$。

证明：此引理由定义2~定义6可直接得到，此处证明略。

定理 1 设属性 $a\in A$，$P\subseteq A$，$a\notin P$，则 $\underline{C_P}(X)\subseteq\underline{C_{P\cup\{a\}}}(X)$，$\overline{C_P}(X)\supseteq\overline{C_{P\cup\{a\}}}(X)$。

证明：对于属性集 P，其构成的覆盖为 C_P，对于属性集 $P\cup\{a\}$，其构成的覆盖为 $C_{P\cup\{a\}}=C_P\cup C_{\{a\}}$，且 $C_P\subseteq C_{P\cup\{a\}}$。设 $\forall x\in\underline{C_P}(X)$，则有 $N_P(x)\subseteq X$。由引理可知，$N_P(x)\supseteq N_{P\cup\{a\}}(x)$，则有 $N_{P\cup\{a\}}(x)\subseteq X$，即 $x\in\underline{C_{P\cup\{a\}}}(X)$，所以，有 $\underline{C_P}(X)\subseteq\underline{C_{P\cup\{a\}}}(X)$。

设 $\forall x\in\overline{C_{P\cup\{a\}}}(X)$，则有 $N_P(x)\cap X\neq\varnothing$，又由引理可知，$N_P(x)\supseteq N_{P\cup\{a\}}(x)$，则 $N_P(x)\cap X\neq\varnothing$，即 $x\in\overline{C_P}(X)$。所以，有 $\overline{C_P}(X)\supseteq\overline{C_{P\cup\{a\}}}(X)$。

推论 1 设属性 $a\in A$，$P\subseteq A$，$a\notin P$，则 $\underline{\Delta}_{C_P}(X)\supseteq\underline{\Delta}_{C_{P\cup\{a\}}}(X)$，$\overline{\Delta}_{C_P}(X)\supseteq\overline{\Delta}_{C_{P\cup\{a\}}}(X)$，$bn_{C_P}(X)\supseteq bn_{C_{P\cup\{a\}}}(X)$。

定理 2 设属性集 $P\subseteq A$，$a\notin P$，则 $\underline{C_P}(X)\supseteq\underline{C_{P-\{a\}}}(X)$，$\overline{C_P}(X)\supseteq\overline{C_{P\cup\{a\}}}(X)$。

证明：证明过程的原理类似于定理1，此处略。

推论 2 设属性集 $P\subseteq A$，$a\notin P$，则 $\underline{\Delta}_{C_P}(X)\subseteq\underline{\Delta}_{C_{P-\{a\}}}(X)$，$\overline{\Delta}_{C_P}(X)\subseteq\overline{\Delta}_{C_{P-\{a\}}}(X)$，$bn_{C_P}(X)\subseteq bn_{C_{P-\{a\}}}(X)$。

4 属性集变化时覆盖粗糙集中近似集增量更新

设覆盖近似空间 $<U,C>$，$X\subseteq U$，通过下面定理来实现 X 的上、下近似的更新。

定理 3 设属性 $a\in A$，$P\subseteq A$，$a\notin P$，则：

$\underline{C_{P\cup\{a\}}}(X)=\underline{C_P}(X)\cup\underline{C_{\{a\}}}(X)\cup Y$

其中，$Y=\{x\big|\bigcup_{x\in X}N_{P\cup\{a\}}(x)\subseteq X\wedge x\in\bigcup_{x\in X}N_P(x)\cap N_{\{a\}}(x)\}$。

证明：“$\Rightarrow$”设 $\forall x\in\underline{C_{P\cup\{a\}}}(X)$，由下近似的定义则有 $x\in U\wedge N_{P\cup\{a\}}(x)\subseteq X$，所以一定有 $\bigcup_{x\in X}N_{P\cup\{a\}}(x)\subseteq X$。如果 $x\notin\underline{C_P}(X)\cup\underline{C_{\{a\}}}(X)$，则有 $N_P(x)\cap X=\varnothing\wedge N_{\{a\}}(x)\cap X=\varnothing$，所以有 $\bigcup_{x\in X}N_P(x)\cap X=\varnothing\wedge\bigcup_{x\in X}N_{\{a\}}(x)\cap X=\varnothing$，但 $\bigcup_{x\in X}N_P(x)\cap N_{\{a\}}(x)\subseteq X$ 矛盾，所以有 $x\in Y$，即 $\underline{C_{P\cup\{a\}}}(X)\subseteq\underline{C_P}(X)\cup\underline{C_{\{a\}}}(X)\cup Y$。“$\Rightarrow$”因为 $\underline{C_P}(X)\subseteq\underline{C_{P\cup\{a\}}}(X)$，$\underline{C_{\{a\}}}(X)\subseteq\underline{C_{P\cup\{a\}}}(X)$，$Y\subseteq\underline{C_{P\cup\{a\}}}(X)$，所以有 $\underline{C_{P\cup\{a\}}}(X)\supseteq\underline{C_P}(X)\cup\underline{C_{\{a\}}}(X)\cup Y$，即 $\underline{C_{P\cup\{a\}}}(X)=\underline{C_P}(X)\cup\underline{C_{\{a\}}}(X)\cup Y$。

定理 4 设属性集 $P\subseteq A$，$a\in P$，则 $\underline{C_{P-\{a\}}}(X)=\underline{C_P}(X)-\underline{\Delta}_{C_{P-\{a\}}}(X)$。

证明：由定理2知，$\underline{C_P}(X)\supseteq\underline{C_{P-\{a\}}}(X)$，又由定义6知，$\underline{C_{P-\{a\}}}(X)\cup\underline{\Delta}_{C_{P-\{a\}}}(X)=X$，$\underline{C_P}(X)\cup\underline{\Delta}_{C_P}(X)=X$，所以有 $\underline{C_{P-\{a\}}}(X)=\underline{C_P}(X)-(\underline{\Delta}_{C_{P-\{a\}}}(X)-\underline{\Delta}_{C_P}(X))$，即 $\underline{C_{P-\{a\}}}(X)=\underline{C_P}(X)\cup\underline{\Delta}_{C_P}(X)-\underline{\Delta}_{C_{P-\{a\}}}(X)$，由推论2可知，$\underline{\Delta}_{C_P}(X)\subseteq\underline{\Delta}_{C_{P-\{a\}}}(X)$，所以有 $\underline{C_{P-\{a\}}}(X)=\underline{C_P}(X)-\underline{\Delta}_{C_P}(X)$。

定理 5 设属性 $a\in A$，$P\subseteq A$，$a\notin P$，则：

$\overline{C_{P\cup\{a\}}}(X)=\overline{C_P}(X)-Z$

其中，$Z=\{x\big|N_{P\cup\{a\}}(x)\cap X\neq\varnothing\wedge x\in N_P(x)-N_{P\cup\{a\}}(x)\}$。

证明：“$\Rightarrow$”设 $\forall x\in\overline{C_{P\cup\{a\}}}(X)$，则有 $x\in N_{P\cup\{a\}}(x)$ 且 $N_{P\cup\{a\}}(x)\cap X\neq\varnothing$。若 $x\in\overline{C_P}(X)$，则有 $x\in N_P(x)$ 且 $N_P(x)\cap X\neq\varnothing$。由定理1知，$\overline{C_P}(X)\supseteq\overline{C_{P\cup\{a\}}}(X)$，又由引理1得，$N_P(x)\supseteq N_{P\cup\{a\}}(x)$，设 $Z=\overline{C_P}(X)-\overline{C_{P\cup\{a\}}}(X)$，则有：

$Z=\{x\in N_P(x)\ -N_{P\cup\{a\}}(x)\mid N_{P\cup\{a\}}(x)\cap X\neq\varnothing\}$

所以有：

$\overline{C_{P\cup\{a\}}}(X)\subseteq\overline{C_P}(X)-Z$。

“$\Rightarrow$” $\forall x\in\overline{C_P}(X)-Z$，则有 $x\in N_{P\cup\{a\}}(x)\cap X=\varnothing$。假若 $x\notin\overline{C_{P\cup\{a\}}}(X)$，那么 $x\notin N_{P\cup\{a\}}(x)\cap X\neq\varnothing$ 矛盾。所以，$x\in\overline{C_{P\cup\{a\}}}(X)$，$\overline{C_{P\cup\{a\}}}(X)\supseteq\overline{C_P}(X)-Z$。综上，$\overline{C_{P\cup\{a\}}}(X)=\overline{C_P}(X)-Z$。

定理 6 设属性集 $P\subseteq A$，$a\in P$，则 $\overline{C_{P-\{a\}}}(X)=\overline{C_P}(X)\cup\overline{\Delta}_{C_{P-\{a\}}}(X)$。

证明：由定理2可知，$\overline{C_{P-\{a\}}}(X)\supseteq\overline{C_P}(X)$，$\overline{\Delta}_{C_P}(X)\subseteq\overline{\Delta}_{C_{P-\{a\}}}(X)$。又由定义7可知，$\overline{C_{P-\{a\}}}(X)=\overline{\Delta}_{C_{P-\{a\}}}(X)\cup X$，$X=\overline{C_P}(X)-\overline{\Delta}_{C_P}(X)$，所以有：

$\overline{C_{P-\{a\}}}(X)=\overline{C_P}(X)\cup(\overline{\Delta}_{C_{P-\{a\}}}(X)-\overline{\Delta}_{C_P}(X))$

即：

$\overline{C_{P-\{a\}}}(X)=\overline{C_P}(X)\cup\overline{\Delta}_{C_P}(X)\cup\overline{\Delta}_{C_{P-\{a\}}}(X)$

由推论2可知，$\overline{\Delta}_{C_P}(X)\subseteq\overline{\Delta}_{C_{P-\{a\}}}(X)$，所以有 $\overline{C_{P-\{a\}}}(X)=\overline{C_P}(X)\cup\overline{\Delta}_{C_{P-\{a\}}}(X)$。

例[9]：设 $U=\{x_1,x_2,x_3,x_4,x_5,x_6,x_7,x_8,x_9\}$ 为9幢房子，$P=\{price,color,structure,surrounding\}$ 为属性集，“$price$”取值为 $\{high,middle,low\}$，“$color$”取值为 $\{good,bad\}$，“$structure$”取值为 $\{reasonable,ordinary,unreasonable\}$，“$surrounding$”取值为 $\{quiet,a\ little\ noisy,noisy,very\ noisy\}$。有4个专家参与评

估房子的各种属性状态，分别为$\{A,B,C,D\}$，4人评估的结果可能各不相同，但具有相同的重要度，全面综合专家意见，将4个专家给出的某个属性值的所有对象合并在一起，形成论域U的覆盖，代表4个属性：

(1)“*price*” C_a: $high=\{x_1,x_2,x_4,x_5,x_7,x_8\}$, $middle=\{x_2,x_5,x_8\}$, $low=\{x_2,x_3,x_5,x_6,x_8,x_9\}$

(2)“*color*” C_b: $good=\{x_1,x_2,x_3,x_4,x_5,x_6\}$, $bad=\{x_4,x_5,x_6,x_7,x_8,x_9\}$

(3)“*structure*” C_c: $reasonable=\{x_1,x_2,x_3\}$, $ordinary=\{x_4,x_5,x_6,x_7,x_8,x_9\}$, $unreasonable=\{x_7,x_8,x_9\}$

(4)“*surrounding*” C_d: $quiet=\{x_1,x_2,x_4,x_5\}$, $a\ little\ noisy=\{x_2,x_3,x_5,x_6\}$, $noisy=\{x_4,x_5,x_7,x_8\}$, $very\ noisy=\{x_5,x_6,x_8,x_9\}$

限于篇幅，下面仅讨论增加属性时，关于集合X的下近似和上近似的更新。

假设集合$X=\{e_1,x_3,e_5,e_8\}$, $P=\{a,b,d\}$, $P\subseteq A$，因此有：

$C_p=\{K_{a1},K_{a2},K_{a3},K_{b1},K_{b2},K_{d1},K_{d2},K_{d3},K_{d4}\}$,

$N_P(x_1)=\{x_1,x_2,x_4,x_5\}$, $N_P(x_2)=\{x_2,x_5\}$,

$N_P(x_3)=\{x_2,x_3,x_5,x_6\}$, $N_P(x_4)=\{x_4,x_5\}$,

$N_P(x_5)=\{x_5\}$, $N_P(x_6)=\{x_5,x_6\}$,

$N_P(x_7)=\{x_4,x_5,x_7,x_8\}$, $N_P(x_8)=\{x_5,x_8\}$,

$N_P(x_9)=\{x_5,x_6,x_8,x_9\}$, $\underline{C_P}(X)=\{x_5\}$, $\overline{C_P}(X)=U$

(1)设属性$c\in A$, $c\notin p$，将属性c添加到P，集合X的下近似增量更新如下：

为求$\underline{C_{p\cup\{c\}}}(X)$，首先计算$Y$和$\underline{C_{\{c\}}}(X)$：

$$Y=\{x\left|\bigcup_{x\in X}N_{P\cup\{c\}}(x)\subseteq X\wedge x\in\bigcup_{x\in X}N_P(x)\bigcap N_{\{c\}}(x)\right.\},$$

$\underline{C_{\{c\}}}(X)=\varnothing$, $N_{\{c\}}(x)=\{N_{\{c\}}(x_1),N_{\{c\}}(x_3),N_{\{c\}}(x_5),N_{\{c\}}(x_8)\}$,

$N_P(x)\bigcap N_{\{c\}}(x)=\{N_{P\cup\{c\}}(x_1),N_{P\cup\{c\}}(x_3),N_{P\cup\{c\}}(x_5),N_{P\cup\{c\}}(x_8)\}$

又因$N_P(x)\bigcap N_{\{c\}}(x)\subseteq X$，有$Y=\{x_3,x_5,x_8\}$。

因此，$\underline{C_{P\cup\{c\}}}(X)=\underline{C_P}(X)\bigcup\underline{C_{\{c\}}}(X)\bigcup Y=\{x_3,x_5,x_8\}$。

(2)设属性$c\in A$, $c\notin p$，将属性c添加到P，集合X的上近似增量更新如下：

为求$x\in\overline{C_{P\cup\{c\}}}(X)$，首先计算$Z$：

$$Z=\{x\left|N_{P\cup\{c\}}(x)\bigcap X\neq\varnothing\wedge x\in N_P(x)-N_{P\cup\{c\}}(x)\right.\}=\varnothing$$

因此，$\overline{C_{P\cup\{\gamma\}}}(X)=\overline{C_P}(X)-Z=U$。

5 结束语

本文给出了属性集增加或减少时，在覆盖广义粗糙集模型中近似集的动态变化趋势及近似集的动态增量更新方法，避免了采用刷新信息系统静态求解近似集的重复计算，以节省大量的时间和空间，为更进一步在覆盖广义粗糙集模型下属性增加、删除时动态获取决策规则提供一种更佳的途径。下一步的主要工作是通过实验仿真验证所本文方法的性能，以及覆盖广义粗糙集模型下属性集变化时动态规则的增量更新方法研究。

参考文献

[1] Zdzistaw P. Rough Sets[J]. International Journal of Computer and Information Sciences, 1982, 11(5): 341-356.

[2] Boinkowski Z, Bryniarski E, Wybraniedc-Skardowska U. Extensions and Intentions in the Rough Set Theory[J]. Information Science, 1998, 107(1): 149-167.

[3] Zhu W, Wang Feiyue. Reduction and Axiomization of Covering Generalized Rough Sets[J]. Information Science, 2003, 152(1): 217-230.

[4] Zhu W. Relationship Among Basic Concepts in Covering-based Rough Sets[J]. Information Sciences, 2009, 179(14): 2478-2486.

[5] 陈 文, 祝 峰, 汤建国. 覆盖粗糙集上近似的研究[J]. 广西师范大学学报: 自然科学版, 2010, 28(3): 93-97.

[6] Li Tianrui, Ruan Da, Wets G, et al. A Rough Set Based Characteristic Relation Approach for Dynamic Attribute Generalization in Data Mining[J]. Knowledge-based Systems, 2007, 20(2): 485-494.

[7] Chen Hongmei, Li Tianrui, Qiao Shaojie, et al. A Rough Set-based Dynamic Maintenance Approach for Approximations in Coarsening and Refining Attribute Valves[J]. International Journal of Intelligent System, 2010, 25(10): 1005-1026.

[8] 季晓岚, 李天瑞, 邹维丽, 等. 优势关系下属性值粗化细化时近似集分析[J]. 计算机工程, 2010, 36(12): 33-35.

[9] Tsang E C C, Chen Degang, Yeung D S. Approximations and Reducts with Covering Generalized Rough Sets[J]. Computers and Mathematics with Applications, 2008, 56(1): 279-289.

编辑 索书志

(上接第152页)

5 结束语

本文通过分析多个现有轻量级协议的优点和安全性的不足，提出一个超轻量级的低成本RFID双向认证协议。安全性分析表明，新协议可以抵抗假冒攻击、重传攻击等常见针对RFID认证协议的攻击。效率分析表明，新协议具有低成本的特点，特别是对于标签运算能力的要求下降，使该协议可适合于一些较低成本RFID系统的应用需求。

参考文献

[1] 白 煜, 滕建辅. 基于Hash锁的同步强化RFID验证协议[J]. 计算机工程, 2009, 35(21): 138-139, 143.

[2] Peris-Lopez P, Hernandez-Castro J C, Estevez-Tapiador J M, et al. LMAP: A Real Lightweight Mutual Authentication Protocol for Low-cost RFID Tags[C]//Proc. of the 2nd Workshop on RFID Security. [S. l.]: IEEE Press, 2006.

[3] Peris-Lopez P, Hernandez-Castro J C, Estevez-Tapiador J M, et al. EMAP: An Efficient Mutual Authentication Protocol for Low-cost RFID Tags[C]//Proc. of IS'06. [S. l.]: Springer-Verlag, 2006: 352-361.

[4] Chien Hung-Yu. SASI: A New Ultralightweight RFID Authentication Protocol Providing Strong Authentication and Strong Integrity[J]. IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing, 2007, 4(4): 337-340.

[5] Lee Y C, Hsieh Y C, You P S, et al. A New Ultralightweight RFID Protocol with Mutual Authentication[C]//Proc. of WASE'09. [S. l.]: IEEE Press, 2009: 58-61.

[6] Peris-Lopez P, Hernandez-Castro J C, Tapiador M E, et al. Security Flaws in a Recent Ultralightweight RFID Protocol[C]// Proc. of International Conference on RFID. Orlando, USA: IEEE Press, 2010.

[7] 鞠伟成, 俞承芳. 一种基于动态二进制的RFID抗冲突算法[J]. 复旦学报: 自然科学版, 2005, 44(1): 46-50.

编辑 陆燕菲