

基于 SI-UNIWARD 失真函数的改进隐写方案

司一帆 魏立线 张英男 刘佳

(武警工程大学密码与信息安全保密重点实验室 西安 710086)

摘要 针对通用小波失真函数(UNIWARD)的失真代价的四舍五入误差为 1/2 时嵌入失真为零的问题,基于边信息的通用小波失真函数(SI-UNIWARD),提出了一种改进隐写方案。该方案首先对前载体的原始像素值进行四舍五入,然后重新定义了一组间距合理的四舍五入误差,产生了新的嵌入代价,重新使用了在 SI-UNIWARD 中禁用的 00、40、04、44 模式中的 1/2 离散余弦变换(DCT)系数,避免了检测性能的病态饱和,从而解决了零嵌入失真代价问题。实验表明,该方案与 SI-UNIWARD 相比,DCT 系数的更改概率降低了 3%,同时降低了空域中像素值间的数量差别和 DCT 系数的嵌入更改率,提升了检测误差性能,能够较好地利用边信息。

关键词 通用小波失真函数;失真函数;图像隐写;自适应隐写;隐写分析

中图分类号 TP309 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2016.5.020

Revised Steganography Scheme Based on SI-UNIWARD

SI Yi-fan WEI Li-xian ZHANG Ying-nan LIU Jia

(Key Laboratory of CAPF for Cryptology and Information Security, Engineering University of CAPF, Xi'an 710086, China)

Abstract To solve the problem of the distortion cost being zero when the rounding error of the distortion cost in UNIWARD is 1/2, a new steganography scheme based on SI-UNIWARD was proposed. At first, the raw pixels of the pre-cover are rounded, then a set of rounded error which have reasonable distance are redefined, and new embedded costs are generated. Consequently, the DCT coefficients of the 00, 40, 04, 44 modes which are prohibited in SI-UNIWARD are re-used. Finally, the pathological behavior of the detection performance is avoided, and the zero-embedding-cost problem is solved. The experimental results show that compared with SI-UNIWARD, the probability of changed DCT coefficients, pixel difference in spatial domain and the changes in spatial domain caused by DCT embedding are lowered, detection performance are promoted, and the side information are better used.

Keywords Universal wavelet relative distortion(UNIWARD), Distortion function, Steganography, Adaptive steganography, Steganalysis

1 引言

当前,数字图像的隐写术日益成为信息隐藏领域的重点。目前存在两类隐写方案的设计原则:模型保持与最小化失真函数。前者主要对载体图像建立特定的模型,通过检测选定模型之外的嵌入更改,其统计特性容易被检测及分析。对于后者,例如文献[1,2]提出的 NPQ^[1]和 BCHopt^[2]等方案相比前者更为高效和安全:通过定义一个失真函数,使用其失真代价表示嵌入信息的更改,以此判断在载体图像上可以嵌入信息的区域(例如纹理区域)。

作为传统隐写方案, NPQ^[1]和 BCHopt^[2]由于其失真代价的定义域及嵌入域相同,因此均只适用于单一域,而无法适用于其他域。为解决上述问题,提出了通用小波相对失真函数(Universal Wavelet Relative Distortion)^[3],其适用域扩展到了空域、JPEG 域以及 SI-JPEG^[5]域。其失真代价为通过方向滤波器分解载体图像得到的小波系数的相对更改之和,其方向滤波器的特性使得载体在有嵌入更改的区域难以建模,

因此其检测性能与之前在单一域上定义的失真函数相比有所提升。

而在 SI(Side Informed)-JPEG^[5]域中,由于 UNIWARD 的嵌入更改集中于 00、04、40、44 这 4 个模式,产生了原本造成失真的区域其嵌入更改为零的病态饱和现象。通过禁用这 4 种模式抑制了此现象,但并未解决对边信息的最优化应用问题。

本文提出了一种针对 SI-UNIWARD 中零嵌入问题的改进隐写方案,该方案在 04 模式上重新设计前载体的舍入误差来取代取整操作,重新使用 1/2DCT 系数,利用边信息抑制“病态饱和现象”的出现,解决了零嵌入代价问题,且表现出较好的内容自适应性。

2 UNIWARD 失真函数

UNIWARD^[3]是一种通用的失真代价函数,按适用域不同分为 S-UNIWARD、J-UNIWARD(Non-side Informed)和 SI-UNIWARD(Side Informed) 3 部分。边信息^[1]即存在于未

到稿日期:2015-12-09 返修日期:2016-01-20 本文受国家自然科学基金(61379152),国家自然科学基金青年基金资助项目(61403417)资助。

司一帆(1992-),男,硕士生,主要研究方向为信息安全、图像隐写;魏立线(1967-),男,硕士,教授,主要研究方向为密码学、信息安全;张英男(1989-),男,博士生,主要研究方向为信息安全;刘佳(1982-),男,博士,讲师,主要研究方向为信息安全、模式识别。

压缩的原始 JPEG 图像中量化表中的特有信息^[3], 在 SI-JPEG^[5] 域中隐写前首先得到的是前载体 (Precover)^[4], 它的特点是带有边信息且未被压缩, 具有更好的图像质量。在嵌入操作之前, 首先需要对其进行量化处理, 例如 LSB (Least Significant Bit) 嵌入、调整奇偶校验位等。

适用于任意域的失真函数即 UNIWARD^[3] 的设计目的源于 WOW (Weight Obtained Wavelet)^[7] 函数, 因 WOW^[7] 计算失真代价的方式较为复杂, 故其无法有效应用于 JPEG 域中。UNIWARD 失真代价设计如下: 首先, 使用一组多贝西小波方向滤波器组 D-WDFB (Daubechies 8-tap Wavelet Directional Filter Bank)^[4] $B = \{K^{(1)}, K^{(2)}, K^{(3)}\}$ 来评估图像在水平、垂直、对角线方向的平滑度。这组滤波器包含 HH、HL、LH 这 3 个高通方向滤波器, 且都由一维低通 (g) 和高通 (h) 滤波器构成:

$$K^{(1)} = h \cdot g^T, K^{(2)} = g \cdot h^T, K^{(3)} = g \cdot g^T \quad (1)$$

隐写流程如图 1 所示, 给定一幅载体图像 X 和对应的隐写图像 Y, 用 $W_{uv}^{(k)}(X)$ 和 $W_{uv}^{(k)}(Y)$ 分别表示 X 和 Y 使用式 (1) 第 k 层分解得到的第 uv 个小波系数, 将 JPEG 图像 X 和 Y 分解到空域, 然后使用小波变换, 得到 X 和 Y 对应的小波系数, 两者相减得到的方向残差与 X 的小波系数相比即为其失真代价, 模型如下:

$$D(X, Y) = \sum_{k=1}^3 \sum_{u=1}^{n_1} \sum_{v=1}^{n_2} \frac{|W_{uv}^{(k)}(X) - W_{uv}^{(k)}(Y)|}{\sigma + |W_{uv}^{(k)}(X)|} \quad (2)$$

其中, D 代表失真代价, k=1, 2, 3 代表小波分解后的子带, $u \in \{1, \dots, n_1\}, v \in \{1, \dots, n_2\}, \sigma$ 为稳定常数, 用于稳定计算, W 为 DCT 域中的小波系数的方向残差。

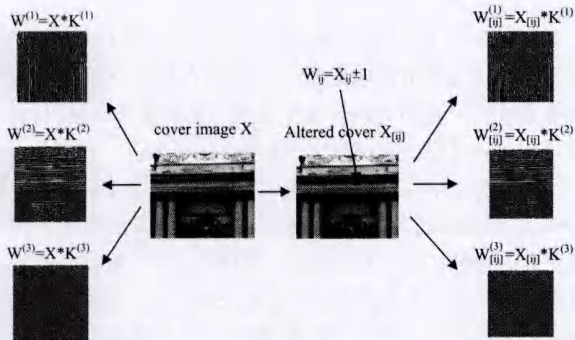


图 1 UNIWARD 隐写方案

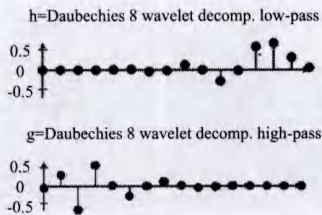


图 2 一维低通和高通滤波器

3 基于 SI-UNIWARD 的改进算法

3.1 SI-UNIWARD 中存在的病态饱和现象分析

文献[3]对于 SI-JPEG 域的嵌入方案如下: 给定前载体 P 的原始 DCT 系数 D_{ij} , 将 D_{ij} 四舍五入以调整奇偶校验位。然后将前载体压缩成 X 的同时得到两者间的误差 $e_{ij} = |D_{ij} - X_{ij}|$, 将 D_{ij} 反向四舍五入就得到了 Y_{ij} , 同时得到其误差 $1 - e_{ij} = |D_{ij} - Y_{ij}|$, 将两者相减得到失真代价的公式:

$$|D_{ij} - X_{ij}| - |D_{ij} - Y_{ij}| = 1 - 2e_{ij} \quad (3)$$

根据上述公式, 将 X 与 Y 经过 DCT 变换到小波域, 其 SI-JPEG^[5] 域中的失真代价模型如下:

$$D^{(SI)}(X, Y) = D(P, J^{-1}(Y)) - D(P, J^{-1}(X)) \\ = \sum_{k=1}^3 \sum_{u=1}^{n_1} \sum_{v=1}^{n_2} \left[\frac{|W_{uv}^{(k)}(P) - W_{uv}^{(k)}(J^{-1}(Y))|}{\sigma + |W_{uv}^{(k)}(P)|} - \frac{|W_{uv}^{(k)}(P) - W_{uv}^{(k)}(J^{-1}(X))|}{\sigma + |W_{uv}^{(k)}(P)|} \right] \quad (4)$$

其中, J^{-1} 代表将 JPEG 图像的量化 DCT 系数解压到空域中得到像素值。

在此模型下, 出现的病态饱和现象如下: 当 e_{ij} 等于 0.5 时, 将失真代价 D_{ij} 向下舍去, 根据式 (3), 计算结果为 0, 实际上这是产生了嵌入更改的区域。当 DCT 系数的数量较小时, UNIWARD^[3] 的安全性未受影响。但随着值为 1/2 的 DCT 系数的数量增加时, 式 (3) 不再是好的统计检测性的度量指标。而且, 当负载接近于 0 时才达到 50% 的随机猜测概率。此现象表明, 零嵌入代价的影响取决于图像中 1/2 系数的数量。产生此现象有两个原因: (1) 用于计算失真代价的 DCT 的实现; (2) JPEG 质量因子的选取。

使用 MATLAB 中的 “dct2” (是 MATLAB 图像处理工具箱实现离散余弦变的一种方法, 用一个基于 FFT 的算法来提高当输入的方阵较大时的计算速度) 命令实现 “慢” DCT 变换时, 实验发现此时还是有少量 1/2 系数存在 (容易产生值为 0 的 DCT 系数)。设置质量因子为 95, 负载从小到中变化, 当使用 JRM+SRMQ1^[5] 富模型隐写分析方法对所有嵌入方法进行检测时, 结果如图 3 所示, 此时检测误差为 25%~30%, 而一个正常的误差范围应达到 50%, 而 NPQ^[1] 和 BCHopt^[2] 算法由于并未选择 DC 模式, 因此没有上述病态饱和现象。在 JPEG 质量因子较低时, 1/2 系数的数量较少, 此时不会影响安全性。但当使用快速整数 DCT 实现时 (即 imwrite, 将图像数据写入到图像文件), 量化步长为 1/8 的倍数, 此时减少量化步长, $e_{ij} = 0.5$ 的系数的数量会增加, 安全性大幅降低。当 JPEG 质量因子很大时, 1/2 系数还是会引起失真代价消失的问题。

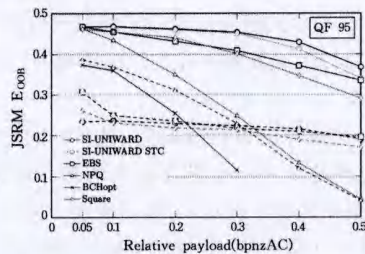


图 3 病态饱和现象

文献[1]给出了一个临时的修正方案, 即给 $e_{ij} = 0.5$ 的值赋予一个很大的权值, 以表明在这些值上确实有嵌入信息。图 3 为文献[1]中各失真函数的性能比较: 以检测误差 E_{OOB} 为性能指标, 质量因子设置为 95, 以 SRMQ1、JRM 以及集成分类器为分析工具, 虚线表示应用所有 04DCT 系数时的情况。图 3 显示, 此操作使 UNIWARD 函数^[3] 的检测误差性能降低了 30%。

$$DCT(P^{(b)})_{kl} = \sum_{i,j=0}^7 \frac{\omega_k \omega_l}{4} \cos \frac{\pi k(2i+1)}{16} \times \cos \frac{\pi l(2j+1)}{16} \cdot P_{ij}^{(b)} \quad (5)$$

其中, $k, l \in \{0, \dots, 7\}$ 代表 DCT 模式, $\omega_k = 1/\sqrt{2}$, $\omega_l = 1 (k > 0)$ 。

式(4)表明, 当 $k, l \in \{0, 4\}$ 时, D_{kl} 的值总是有理数, 因为此时的余弦值为 1 或 $\frac{\sqrt{2}}{2}$, 在乘法权重 w 的计算下总是有理数。在 00 模式下, DC 系数为 1/4 的倍数, 04 和 40 模式下的 DC 系数则为 1/8 的倍数, 44 模式下的 DC 系数则为 1/16 的倍数。而其他模式中, DC 系数为无理数。对于 1/2 系数, 任何代价为 0 的嵌入都会集中于 00、40、04、44 这 4 种系数为有理数的模式, 这会造成 DCT 系数嵌入改变的极度不均匀分布。由于 JPEG 富模型^[5]检测时会统计各个模式的系数使用量, 即使在低负载的情况下, 此方法也能够检测出相关的统计特性。随着质量因子的升高, DCT 系数分布会越来越向这 4 种模式集中。

UNIWARD^[3]将产生零嵌入失真代价的 4 种 DCT 模式^[10]00、40、04、44 中的 DCT 系数赋予较大嵌入代价, 从而禁止在这些模式中的 1/2 系数上产生人为更改, 极大地抑制了病态饱和现象的产生。

3.2 基于 SI-UNIWARD 的改进隐写算法

然而, 此方案并未完全抑制病态饱和现象的产生。SI-UNIWARD^[3]中产生 1/2 系数问题的原因如下: 根据式(5), 当系数 i 和 j 只取 0 和 4 这两个值时, 计算出的 DCT 系数为有理数, 且均为 1/8 的倍数。之后, 将这些值代入式(5)得到以下值: $\{1, 0.75, 0.5, 0.25, 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1\}$ 。此时实验发现了当系数值为 0.5 时代价消失的问题, 然而此处确实造成了嵌入更改, 根据前后数值推算得到此处的嵌入代价应为一个较小的值但不为 0。

在了解了 S-UNIWARD 的问题及其产生原因之后, 本文提出了下述解决方案:

Step 1 从前载体提取原始像素值, 将原始值四舍五入;

Step 2 按照式(4)计算失真代价;

Step 3 将上述第一组列举出的四舍五入的误差值替换为以下误差集合: $\{\alpha, \alpha+\beta, \alpha+2\beta, \alpha+3\beta, \alpha+4\beta, \alpha+5\beta, \alpha+6\beta, \alpha+7\beta, \alpha+8\beta\}$, α 表示初始值, β 表示相邻误差值间的差距。

Step 4 将以上误差集代入式(3), 得到一组新的嵌入代价集合: $\{\gamma+4\epsilon, \gamma+3\epsilon, \gamma+2\epsilon, \gamma+\epsilon, \gamma, \gamma+\epsilon, \gamma+2\epsilon, \gamma+3\epsilon, \gamma+4\epsilon\}$, γ 表示初始值, ϵ 表示相邻嵌入代价间的差距。

值得注意的是, α 和 γ 分别为误差的初始值和嵌入代价的初始值, 需要在实验中确定, 为能尽量接近实际失真, 原则上取值应尽量小并趋于零。 β 和 ϵ 作为相邻值的间距, 取值范围应在 0 到 0.25 之间。

方案分析如下。

本方案不再禁止 1/2 系数处的嵌入, 即当 DCT 系数为 1/2 时, 对嵌入区域赋予大权重, 使此处不再适合嵌入信息。SI-UNIWARD 中由于任何失真代价为 0 的嵌入集中的 DC 系数为有理数这一特性, 因此 1/2 系数会集中于 00、04、40、44 这 4 个造成误差的病态饱和现象的模式。通过赋予 1/2 系数接近实际的失真代价, 信息不再集中于上述 4 个模式, 解决了嵌入信息的分布不均问题。即使当负载相同并且 JPEG 质量因素很大时, 1/2 系数也不会影响隐写分析时的统计检测性, 从而抑制了检测误差的病态饱和现象。

对于 DCT 系数的处理, 实验遵循以下原则:

(1) 临时修正方案的一组 DCT 系数均为 1/8 的倍数, 相邻系数间的差固定为 1/8, 本方案处理后的值也应使得相邻系数间距相同。在实验中选定 $\alpha=0.05, \beta=0.1, \gamma=0.1, \epsilon=0.2$, 1/2 系数处的处理并未排除 0.55 的值, 这是因为式(2)带有绝对值, 0.45 与 0.55 计算得到的嵌入代价相同, 为了计算简便, 1/2 系数统一为 0.45。

(2) 为尽量不影响失真函数的性能, 尽可能少地引入人为改变的像素值。在 UNIWARD^[3]的构造原理中, 其失真代价用小波系数的相对改变来表示。本方案使嵌入代价之间的间距一致, 并且将失真代价同时扩大, 通过式(3)的计算, 实验结果中失真代价的人为改变被抵消了, 在把 1/2 系数的失真情况表示出来的同时并未对其它系数的失真代价作改动。

4 实验及分析

4.1 实验环境

本文实验基于 BOSSbase database ver. 1.01^[8]载体库进行。它包含 10000 幅 512×512 的 8 位灰度图, 本文选取其中 1000 幅图作为特征提取对象。实验所用软件为 MATLAB R2012a。SI-UNIWARD^[3]使用量化步长为 1 的 12753 维的缩减的 SRM^[9]的联合以及 22510 维度的 JPEG 富模型分析, 两者特征维度总和为 35263。所有分类器使用基于 Fisher 线性准则的集成分类器^[10]作为基学习器。此时的安全性以集成的“out-of-bag”(OOB)误差作为量化标准, 评估模型如下:

$$P_E = \min P_{FA} \frac{1}{2} (P_{FA} + P_{MD}) \quad (6)$$

参数选定: 此时的负载选定 $\alpha=0.4$ bpp, 式(4)中的 σ 选定为 2^{-6} , 上述参数的选定基于 SI-UNIWARD 之前研究的最优化结果^[11]。此时的嵌入操作应用三重故障网格编码 (Syndrome_Trellis Coding, STC)^[12]构造。

选取图 4 中左图作为实验对象, 通过确定 JPEG 质量因子 (quality factor)^[9], 改变负载大小, 本节主要用空域中的像素差异的数量、DCT 域中的嵌入改变率、DCT 系数的改变量及改变概率这 3 个参数作为本改进方案相比文献[3]的临时修正方案是否提升的细节依据, 图 4 中右图为嵌入信息后的隐写图像, 以下为对比结果。



图 4 载体图像与隐写图像

4.2 实验分析

(1) 空域中像素差异的数量

通过统计空域中各像素值出现的次数, 画出直方图。实验结果如图 5 所示, 左图为文献[3]临时修正方案的实验结果, 右图为本文改进方案的实验结果。对比 UNIWARD 临时修正方案的实验结果发现, 当像素值在 -15 到 10 之间时, 像素差异数的变化并不显著。当像素值大于 10 时, 随着改变量变大, 空域中的像素点的改变量有明显减少。这是因为改进

后的 DCT 模式^[10]都被使用了,信息嵌入分布随之变大。

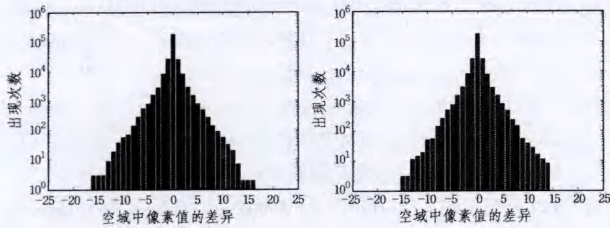


图5 空域中不同像素值之间的数量差

(2) DCT 域中的嵌入改变率

通过将隐写图像与原始图像作差值运算,建立近似导数,显示图像的嵌入改变,实验结果如图 6 所示,左图之前临时方案实验的结果,右图为本文改进方案修正后的结果。以 512×512 的载体图像为实验对象。从实验结果看出,DCT 域中的改变量相对之前的临时方案有所减少。这说明本文方案解禁 DCT 模式的操作对 SI-UNIWARD^[3]性能有所提升。这是本文的改进方案能较好地应用于隐写的优势,因为本方案的嵌入占用了较多的载体数据,从而减少了对载体图像的改变,提高了嵌入效率。

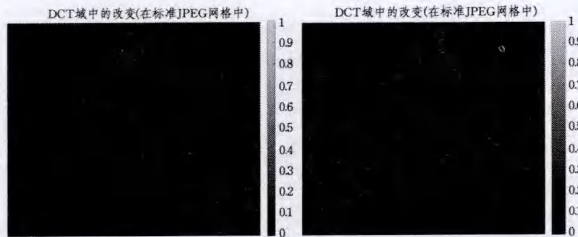


图6 DCT 域中的嵌入改变率的比较

(3) DCT 系数的改变量及改变概率

将 DCT 系数矩阵转化为直方图,对比原始图像,统计改变量及概率,实验结果如图 7 所示,其中图 7(a)为临时方案的实验结果,图 7(b)为本文改进方案的实验结果。

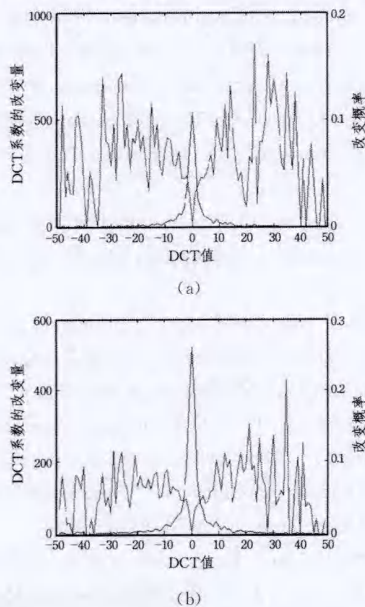


图7 系数改变量以及改变概率的比较

从实验结果看出,在系数的改变概率上,当 DCT 值处于 $-5 \sim 0$ 之间时,改变概率下降至 $0 \sim 0.1$ 之间;当 DCT 值处

于 $0 \sim 50$ 之间时,在值为 36 左右概率有所上升,在 36 两侧的值均有明显降低,并且在 DCT 系数的改变量上其峰值也有所减少。这是因为对 DCT 值的信息嵌入的选择随着 DCT 模式的增多而增多。

表 1 显示了实验中更改四舍五入误差的比较。从实验结果看出,本文改进方案消除了 $1/2$ 系数导致的病态饱和现象,解决了失真代价消失的问题,同时非零 AC 系数的改变率从 0.0592 下降到了 0.0574。这是因为本文方案中,DCT 模式的使用频率相对多的模式(例如 04、40、44、00 模式)减少了。检测结果表明,本文改进方案能够在 SI-JPEG 域上较好地利用边信息。

表1 模板图像的性质示例

四舍五入误差集	运行时间(s)	非零 AC 系数更改率
0.15,0.25,0.35,0.45, 0.65,0.75,0.85,0.95	24.0382	0.0574
0.16,0.26,0.36,0.46, 0.66,0.76,0.86,0.96	25.0256	0.0584
0.17,0.27,0.37,0.47, 0.67,0.77,0.87,0.97	24.8224	0.059
0.18,0.28,0.38,0.48, 0.68,0.78,0.88,0.98	25.2568	0.0584
0.19,0.29,0.39,0.49, 0.69,0.79,0.89,0.99	24.8795	0.0592

结束语 本文针对 SI-UNIWARD 失真代价的舍入误差 e_{ij} 为 $1/2$ 时产生的失真消失问题,提出了一种新的改进方案。此方案通过将 $1/2$ 系数得到的四舍五入误差同时小幅改动为间距相同的值,消除了由 $1/2$ 系数引起的病态饱和现象,同时解禁了 04DCT 模式。实验结果显示,该方案在 DCT 系数的改变概率、空域中像素值间的数量差别和 DCT 系数的嵌入改变率这 3 方面性能有所提升,且具有更好的内容自适应性,对 JPEG 图像嵌入时能够更好地利用未压缩图像的边信息进行嵌入。

边信息的利用还没有达到最优的程度,对通用失真函数的设计还有待进一步的研究。对 SI-JPEG 域上失真函数的研究将作为作者下一步的研究重点。

参考文献

- [1] Huang F, Huang J, Shi Y Q. New channel selection rule for JPEG steganography[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2012, 7(4): 1181-1191
- [2] Sachnev V, Kim H J, Zhang R. Less detectable JPEG steganography method based on heuristic optimization and BCH syndrome coding[C]// Dittmann J, Craver S, Fridrich J, eds. Proceedings of the 11th ACM Multimedia & Security Workshop, 2009: 131-140
- [3] Holub V, Fridrich J. Universal distortion function for steganography in an arbitrary domain[C]// EURASIP Journal on Information Security, Special Issue on Revised Selected Papers of the 1st ACM IH and MMS Workshop(2013), 2013
- [4] Holub V, Fridrich J. Designing steganographic distortion using directional filters[J]. IEEE International Workshop on Information Forensics and Security, 2012, 2(4): 234-239
- [5] Huang F, Luo W, Huang J, et al. Distortion function designing for JPEG steganography with uncompressed side-image[C]// 1st ACM Information Hiding and Multimedia Security Workshop.

[6] Ker A D. A fusion of maximal likelihood and structural steganalysis[C]//9th International Workshop. Springer Berlin Heidelberg, 2007; 204-219

[7] Kodovsky J, Fridrich J. Steganalysis of JPEG images using rich models[C]// Proceedings SPIE, The International Society for Optical Engineering, 2012; 1-13

[8] Filler T, Pevny T, Bas P. BOSS(Break Our Steganography System)[OL]. <http://www.agents.cz/boss>

[9] Fridrich J, Kodovsky J. Rich models for steganalysis of digital images[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2011, 7(3): 868-882

[10] Kodovsky J, Fridrich J, Holub V. Ensemble classifiers for steganalysis of digital media[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2012, 7(2): 432-444

[11] Holub V, Fridrich J. Digital image steganography using universal distortion[C]// 1st ACM Information Hiding and Multimedia Security Workshop. Montpellier, France, 2013

[12] Filler T, Judas J, Fridrich J. Minimizing additive distortion in steganography using syndrome-trellis codes[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2011, 6(3): 920-935

(上接第 72 页)

E_A 的值最小。

结束语 作为一种近年新兴的无线网络技术, ZigBee 网络在森林火灾检测、环境监测、矿井人员定位等环境中得到广泛的应用, ZigBee 网络的节点电池能量的有效利用能延长其生命周期。当前, ZigBee 网络节能主要集中于跨层考虑优化和改进能耗, 或引入某种节点能耗均衡策略。本文采用分布式邻居发现机制研究 ZigBee 网络能耗。该机制使得 ZigBee 网络中的节点在其可访问的区域内及时发现邻居节点, 通过分析和定义在分布式邻居发现算法下 ZigBee 节点在整个发现过程中所需要的平均帧数, 提出 ZigBee 网络能耗模型, 对 ZigBee 网络节点和邻居节点分别在不同算法下的能耗进行详细分析并得出能耗表达式。

在仿真实验中, 比较了 ZigBee 网络节点和邻居节点在不同算法下的工作循环模式和连续模式下设备的能耗, 实验结果表明对于基于分布式邻居发现机制算法的 ZigBee 网络能耗, 当帧时隙数较小时, 在选择争用树算法时能获得较好的节能效果; 当帧时隙数较大时, 选择无反馈帧时隙算法或有反馈帧时隙算法则可减少节点能耗, 以延长 ZigBee 网络的生命周期。

参 考 文 献

[1] Sun J S. Research on energy consumption mechanism based on ZigBee Network[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2015(in Chinese)
孙建书. ZigBee 网络能耗优化机制的研究与实现[D]. 北京: 北京邮电大学, 2015

[2] Cao J L, Liu W P, Ren Z, et al. Energy-balanced routing algorithm based on cross-layer design for Inter-PAN communications in Zigbee Networks[J]. Computer Science, 2014, 41(8): 144-147(in Chinese)
曹建玲, 刘文朋, 任智, 等. 基于跨层机制的 ZigBee 网络 PAN 间能耗均衡路由算法[J]. 计算机科学, 2014, 41(8): 144-147

[3] Jin R C, Han Q P, Chen Z Q, et al. Calculating method of node energy consumption for ZigBee wireless networks; China, 201110149806[P]. 2011. 09. 14(in Chinese)
金仁成, 韩庆普, 陈真清, 等. ZigBee 无线网络节点的能耗计算方法: 中国, 201110149806[P]. 2011. 09. 14

[4] Schoute F C. Control of ALOHA signalling in a mobile radio

trunking system[C]// International Conference on Radio Spectrum Conservation Techniques. 1980(188): 38-42

[5] Wieselthier J E, Ephremides A, Michaels L A. An exact analysis and performance evaluation of framed ALOHA with capture [J]. IEEE Transactions on Communications, 1989, 37(2): 125-137

[6] Klaus F. RFID handbook: Fundamentals and applications in contactless smart cards and identification [M]. Hardcover, 2003; 61-159

[7] Burdet L A. RFID multiple access methods[OL]. http://www.vs.inf.ethz.ch/edu/SS2004/DS/reports/06_rfid-mac_report.pdf

[8] Cha J R, Kim J H. Dynamic framed slotted ALOHA algorithms using fast tag estimation method for RFID system[C]//Proc. of IEEE CCNC. 2006; 768-772

[9] Vogt H. Efficient object identification with passive RFID tags [M]//Pervasive Computing. Springer Berlin Heidelberg, 2002; 98-113

[10] Vogt H. Multiple object identification with passive RFID tags [C]//2002 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. IEEE, 2002, 3: 6

[11] Egea-López E, Vales-Alonso J, Martínez-Sala A S, et al. Performance evaluation of non-persistent CSMA as anti-collision protocol for active RFID tags [M]//Wired/Wireless Internet Communications. Springer Berlin Heidelberg, 2007; 279-289

[12] Capetanakis J. Tree algorithms for packet broadcast channels [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1979, 25(5): 505-515

[13] Janssen A, Jong M. Analysis of connection tree algorithms[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2000, 46(6): 2163-2172

[14] Su X, Xiao Y. Analysis of energy consumption for multiple object identification system with active RFID tags[J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2008, 8(7): 953-962

[15] Law C, Lee K, Siu K Y. Efficient memoryless protocol for tag identification[C]// Proceedings of the 4th International Workshop on Discrete Algorithms and Methods for Mobile Computing and Communications. ACM, 2000; 75-84

[16] Namboodiri V, Gao L. Energy-aware tag anti-collision protocols for RFID systems [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2010, 9(1): 44-59