基于 Arnold 变换的图像信息伪装算法*

陈　铭, 平西建
(信息工程大学 信息科学系, 河南 郑州 450002)

摘　要: 在对图像以二维 Arnold 变换置乱的基础上,根据八邻域内像素之间的相关性来确定 LSB(最低有效位)的替换方式,提取时只需提取置乱图像的 LSB 即可。该算法结合了图像置乱技术和改进的 LSB 嵌入方案,使嵌入的数据获得了抗检测和抗提取的双层安全保障。实验结果表明,该算法能够有效地抵抗 RS(Regular Singular)和 SPA(Sample Pair Analysis)隐写分析,并保持了图像的直方图统计特征,此外,适用于灰度图像和彩色图像,易于实现。

关键词: 信息伪装; 隐写分析; 图像置乱; Arnold 变换; LSB 嵌入
中图法分类号: TP391　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1001-3695(2006)01-0235-04

Image Steganography Based on Arnold Transform

CHEN Ming, PING Xi-jian
(Dept. of Information Science, University of Information Engineering, Zhengzhou Henan 450002, *China)*

Abstract: In the foundation of scrambling image by tow-dimensional Arnold transform, the LSB(Least Significant Bit) embedding scheme is determined by the correlation between the pixels in the eight neighborhood. The embedded message can be extracted from LSBs of transformed image. The presented steganography approach combines image scrambling technology and modified LSB embedding and provides double protection for the embedded message, which makes the embedded message undetectable and unextractable by the attacker. Experimental results show that the proposed approach is undetectable by RS(Regular Singular) analysis and SPA(Sample Pair Analysis) analysis and the histogram's statistical property is preserved well. Otherwise, it is applicable for both gray images and color images and can be implemented conveniently.

Key words: Steganography; Steganalysis; Image Scrambling; Arnold Transform; LSB Embedding

信息隐藏技术是信息安全领域的一个新的研究热点,自 20 世纪 90 年代以来,这方面的研究越来越受到人们的关注,并且在军事、政治、商业等领域得到了广泛应用。它为在开放的网络环境下进行具有机密性质的数据通信、数字产品的版权认证和知识产品的产权保护、重要文件和数字签名的真实性认证提供了可靠的信息安全保障[1]。

信息伪装作为信息隐藏技术中的一个重要分支,担当着将秘密消息隐藏到载体当中,由消息嵌入者通过一定的信道发送至接收者,再由接收者提取出秘密消息,最终完成隐蔽通信的任务。而在这个通信过程当中,势必会面临着安全问题,这就要求嵌入秘密消息对载体所带来的失真度必须达到不可检测的要求。这里的不可检测是指嵌入消息的行为不被人的感觉器官以及对载体的各种统计分析所觉察。

LSB(最低有效位)替换是出现得较早也是一种经典的信息伪装方案,传统的 LSB 嵌入方式主要分为序贯式嵌入和随机间隔式嵌入[2]。一般的 LSB 替换方法是直接以消息比特来修改像素的 LSB 值,使图像的 LSB 与消息保持一致,具有对载体文件改动小、嵌入量大、实现简单的特点。这样的修改虽然简单易行,但会明显改变图像的灰度直方图分布,使得攻击者通过分析直方图统计特征的改变,从而检测出隐蔽信息的存在并估计其大小成为可能。目前已出现多种可准确检测空域 LSB 替换的隐写分析方法,如 Westfeld 等人[3] 提出的基于像素值对(PoVs)的统计分析方法, J. Fridrich 研究小组[4,5] 提出的像素对(RQP)方法和 RS(Regular Singular)分析方法,以及 S. Dumitrescu 等人[6] 提出的基于准素集 SPA(Sample Pair Analysis)的分析方法和张涛[7] 提出的基于差分直方图的检测方法等。

随着隐写分析技术的不断发展,对信息伪装算法的性能要求也越来越高,在保持相当嵌入容量的同时提高算法的安全性,成为信息伪装技术研究中的重点和难点。对嵌入载体进行一定的预处理可为提高系统的安全性带来帮助,对于以图像为载体的信息伪装系统来说,置乱变换是一种有效的预处理方法。本文提出了一种基于图像置乱变换的信息伪装算法,首先对图像进行 Arnold 置乱变换的预处理,记下变换次数,并以此作为密钥来控制数据嵌入和提取,再以八邻域内像素值的差值作为像素间的相关性度量,以此确定 LSB 的更改方式,嵌入完毕利用置乱变换的周期进行恢复,最终得到载密图像,在提取时只需对载密图像以密钥次数进行置乱,再提取图像的 LSB 即可。

1　数字图像置乱与 Arnold 变换

1.1　数字图像置乱

数字图像的置乱技术主要用于数字图像的预处理和后处理,目的在于将图像白噪声化,这使得图像的能量能够均匀分

收稿日期: 2005-01-10; 修返日期: 2005-03-16
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60473022)

布。如果把图像视为信道,那么置乱将增大这个信道的带宽,这对于数据的嵌入来说就意味着为嵌入提供了更多的空间。以一个大小为 $M \times N$ 的图像为例,将其视为二维平面区域 R 内的二元函数 $F(x,y)$,$(0 \le x < M, 0 \le y < N) \in R$,其中$(x,y)$ 即为图像中像素点的坐标,坐标值表示该点对应的图像信息(灰度值或者 RGB 分量值)。改变像素的位置或者像素的图像信息值就可得到一幅新的图像,改变后的图像与原图之间差异越大,说明置乱效果越好。图像置乱后的恢复也是置乱技术研究中的一个重要课题,如果通过置乱变换的逆运算来恢复图像,往往会因运算过于复杂而产生误差,因此一般利用置乱变换的周期来恢复图像信息。因此,只有具有周期性的置乱变换对于图像的加密或者数据嵌入才具有实际意义。

目前,使用较多的图像置乱变换技术主要有 Hilbert 曲线、Arnold 变换和幻方置乱变换等方法,本文采用是其中的 Arnold 变换。

1.2 Arnold 变换

Arnold 变换是由 Arnold 在遍历理论研究中提出的一种变换,依据所选择的相位空间的不同可分为二维、三维、四维直至 N 维的 Arnold 变换。这里采用的是二维 Arnold 变换,对于大小为 $N \times N$ 的图像,二维 Arnold 变换[9]定义为

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} (\bmod N) \quad (1)$$

其中 $x, y \in \{0, 1, K, N-1\}$。$(x, y)$,$(x', y')$ 分别表示像素在图像矩阵中变换前后的坐标,这样的变换实质就是一一对应的位置变换。变换运算遍历图像所有像素以后,将坐标(x, y) 对应的图像信息映像到新坐标(x', y')就可得到一幅新的“面目全非”的图像。下面以 512 ×512 灰度图像为例给出 Arnold 变换的效果图。

图 1 为 Baboon 原始图像,图 2、图 3 和图 4 分别是进行了一次、50 次和 100 次 Arnold 变换后的效果图。可以看出经过了 50 次和 100 次变换后,图像已经不具有任何原图的轮廓或者形状特征,视觉上呈现为杂乱无序的,类似于噪声的分布,置乱效果非常良好, 而且运算也较为简单。

利用 Arnold 变换进行预处理的另一优势在于其具有很好的周期性,由此可保证置乱图像的恢复以及嵌入数据的提取。表 1 给出了 N 不同时 Arnold 变换的周期。设 $N \times N$ 图像的变换周期为 T,依据变换后的混杂程度选定变换次数 C,在进行了 C 次变换的图像中嵌入数据,嵌入完成后再对图像进行 $T-C$ 次变换便可恢复得到显示正常的载密图像。提取时将载密图像进行 C 次变换便可完成提取,换句话说,消息接收方只有掌握了正确的变换次数 C 才能正确提取数据,这等于为数据又提供了一层保护,这也正是置乱的意义所在。


图 1 Baboon 原始图像

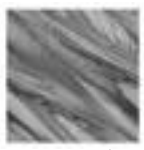
图 2 一次 Arnold 变换


图 3 50 次 Arnold 变换


图 4 100 次 Arnold 变换

表 1 不同阶数 N 所对应的 Arnold 变换的周期 T

N	2	5	50	100	128	256	480	500	512
T	3	10	150	150	96	192	120	750	384

2 LSB 嵌入方案

2.1 RS 算法与 SPA 算法

目前在针对 LSB 替换的隐写分析方法中,比较具有代表性的有 J Fridrich 等人提出的 RS 分析方法和 S. Dumitrescu 等人提出的 SPA 分析方法,以及张涛提出的基于差分直方图的检测算法,本文只对其中的 RS 和 SPA 分析方法展开讨论。

RS 和 SPA 分析方法是 LSB 替换隐写分析中的经典之作。RS 算法的基本思想是利用 LSB 嵌入造成图像自身某些相关性的变化,如相邻像素灰度值之间的相关性。分析这种相关性的变化与嵌入消息大小之间的关系,并将这个关系建立为一个二次方程,通过计算方程的根来估计嵌入消息的大小。SPA 分析方法对 LSB 替换做了更深入的分析,建立了自然图像 LSB 替换的概率统计模型,应用集合论的方法对 LSB 替换造成的像素值之间的转换机制进行了更全面的理论解释,并对 RS 分析中的一个特例进行了理论证明。SPA 分析方法把图像全体像素分为三个基本集 X, Y, Z,在图像的 LSB 平面中嵌入消息将会使像素在 X, Y, Z 之间相互转换,从而使它们的势产生改变。与 RS 分析方法类似,S. Dumitrescu 依据像素值被改动的概率来描述基本集势的改变,再根据两个基本假设推导出载密图像中基本集的势关于消息长度的二次方程,以方程的根作为消息长度的估计。

上述两种隐写分析方法都可对传统的 LSB 替换进行准确的检测,并可以精确地估计出消息长度。

2.2 改进方案

由以上讨论可知,RS 和 SPA 分析方法都是利用传统 LSB 替换所产生的像素值对之间的转换关系,对图像因嵌入消息所产生的统计差异进行分析,因此改变 LSB 的替换机制,使像素值不再遵循上面所设定的值对转换规律,就可以有效地抵抗这两种方法的攻击。基于以上分析,提出一种改进的 LSB 嵌入方案,具体描述如下。

设待嵌入的消息比特为 m,对应嵌入位置的像素灰度值为 $x_{i,j}$,嵌入消息比特后像素值为 $x'_{i,j}$。如果 m 与 $x_{i,j}$ 的 LSB 相同,则不对 $x_{i,j}$ 作改动;如果不同,先判断当前像素灰度值是否为 0 或者 255,为 0 则加 1,为 255 则减 1;如果两者都不是,则计算当前像素八邻域内像素值的差值 S,S 大于 0 则将 $x_{i,j}$ 减 1,S 小于 0 则将 $x_{i,j}$ 加 1。

$$S = \sum_{u=i-1}^{i+1} \sum_{v=j-1}^{j+1} x_{u,v} - 9x_{i,j} \quad (2)$$

对不同情况的统一表示如下:

$$x'_{i,j} = \begin{cases} x_{i,j} & \text{if } m = x_{i,j} \bmod 2 \\ x_{i,j} + 1 & \text{if } m \neq x_{i,j} \bmod 2 \text{ 且 } x_{i,j} = 0 \\ x_{i,j} - 1 & \text{if } m \neq x_{i,j} \bmod 2 \text{ 且 } x_{i,j} = 255 \\ x_{i,j} + 1 & \text{if } m \neq x_{i,j} \bmod 2 \text{ 且 } S < 0 \\ x_{i,j} - 1 & \text{if } m \neq x_{i,j} \bmod 2 \text{ 且 } S > 0 \end{cases} \quad (3)$$

式(3)的改动结果将使像素值在需要改动时随机地加 1 或减 1,这种替换方法的消息嵌入量、对图像带来的质量退化以及对嵌入消息的提取均与传统的 LSB 替换方法一致。

实验表明,采用上述方法嵌入消息之后,RS 和 SPA 分析方法都将检测不出秘密消息的存在,这是因为 RS 和 SPA 分析

都是基于像素值对之间的转换关系。对 RS 分析得到的结论, 改进的替换机制使所定义的规则组与不规则组的数目[5] 不再随着消息长度的改变而改变, 从而不论在 LSB 平面嵌入多少比例的消息, 消息长度估计结果始终近似为 0。而对于 SPA 分析, 替换结果也使三个基本集的势在嵌入消息前后的改变不再服从所推导出的转换关系式[6], 嵌入消息后始终保持有 $|X| = |Y|$, 因此对消息长度的估计也近似为 0。

此外, 该方法不会改变图像的直方图分布, 以 $I(i)$ 与 $I'(i)$ 分别表示嵌入消息前后图像的直方图, 依据 LSB 替换机制有:

$$I'(i) = 1/4 \times I(i-1) + 1/2 \times I(i) + 1/4 \times I(i+1) \quad (4)$$

由式(4) 可知, 载密图像直方图是载体图像直方图的平滑, 保持了图像的直方图统计特征。

3　算法流程

3.1　嵌入过程

嵌入算法流程如图 5 所示, 具体步骤描述如下:

(1) 对载体图像进行二维 Arnold 变换, 由表 1 得到图像阶数 N 对应的变换周期 T, 并根据图像变换后的混杂程度选定变换次数 C, 得到置乱图像。这里经过比较置乱效果选定 $C = T/2 + 4$, 以 C 作为提取时所需的密钥。

(2) 判断图像是灰度图像(color = 1) 还是彩色图像(color = 3), color = 1 则转至第(3) 步, color = 3 则转至第(4) 步。

(3) 计算当前像素对应的 S 值, 按式(3) 对灰度值作出改动, 完成在当前像素中嵌入 1 比特消息, 转至第(5) 步。

(4) 提取彩色图像的 R, G, B 三个分量, 在三个分量图像中分别计算当前像素对应的像素差值 S_R, S_G, S_B, 以 B→G→R 的顺序依次对三个分量的灰度值按式(3) 作出改动, 完成在当前像素中嵌入 3 比特消息。

(5) 读取下一位置像素, 灰度图像重复第(3) 步操作, 彩色图像重复第(4) 步操作, 直至秘密消息嵌入完毕。

(6) 对载密的置乱图像以变换次数 $C' = T - C$ 进行二维 Arnold 变换, 这里 $C' = T/2 - 4$, 得到显示正常的载密图像, 至此, 嵌入流程进行完毕。

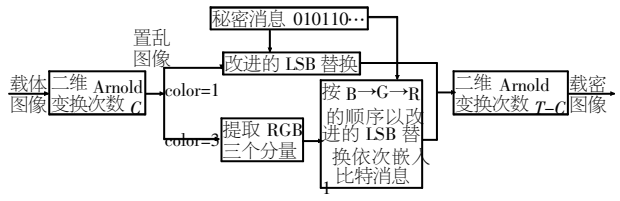

图 5 嵌入算法流程

3.2　提取过程

由密钥 C 确定载密图像的置乱变换次数, 提取置乱图像的 LSB 即可提出嵌入的消息。具体描述如下:

(1) 对载密图像进行 C(密钥) 次二维 Arnold 变换, 判断图像是灰度图像(color = 1) 还是彩色图像(color = 3), color = 1 则转至第(2) 步, color = 3 则转至第(3) 步。

(2) 提取当前像素灰度值的 LSB, 转至第(4) 步。

(3) 提取彩色图像的 R, G, B 三个分量, 以 B→G→R 的顺序依次提取当前像素三个分量值的 LSB。

(4) 读取下一位置像素, 灰度图像重复第(2) 步操作, 彩色图像重复第(3) 步操作, 直至秘密消息提取完毕。

4　实验结果与分析

为验证算法的性能, 分别选取了大小均为 512 ×512 的两幅标准灰度图像 Women2 和 Bridge, 两幅彩色图像 Lake 和 Plane 作为载体图像(图 6), 在不同嵌入率下进行了实验, 嵌入消息为伪随机序列, 以峰值信噪比(PSNR) 作为图像质量退化度量。为区别灰度图像和彩色图像的嵌入效果, 对彩色图像的三个颜色分量分别进行检测和计算 PSNR。表 2 给出了 RS 算法和 SPA 算法对载密图像嵌入率的估计结果, 表 3 给出了不同嵌入率下载体图像与载密图像的 PSNR。图 7 给出了载体图像与嵌入率为百分之百的载密图像的直方图包络曲线的比较。

(a) Women　(b) Bridge　(c) Lake　(d) Plane

图 6 载体图像

表 2　RS 算法和 SPA 算法的检测结果(%)

	10%		30%		50%		70%		100%	
	RS	SPA	RS	SPA	RS	SPA	RS	SPA	RS	SPA
图 7(a)	-0.348	-0.513	-0.044	-0.241	-0.038	-0.146	-0.320	-0.123	0.308	0.007
图 7(b)	0.294	-0.340	0.573	-0.392	0.467	-0.163	0.229	-0.070	0.003	-0.156
图 7(c) B 分量	0.237	-0.112	0.190	-0.054	0.197	-0.336	-0.108	0.198	0.107	0.221
图 7(c) G 分量	-0.157	0.159	0.052	-0.019	0.121	0.154	0.186	0.283	0.171	-0.047
图 7(c) R 分量	-0.162	-0.390	-0.002	-0.373	-0.017	-0.072	0.429	-0.261	0.175	0.219
图 7(d) B 分量	0.279	0.025	0.042	0.180	0.015	-0.058	0.015	0.052	0.043	0.000
图 7(d) G 分量	0.567	0.106	0.223	-0.047	0.387	0.144	0.281	0.188	-0.352	0.038
图 7(d) R 分量	-0.105	0.100	-0.028	-0.177	0.268	-0.136	0.069	-0.056	0.274	0.028

表 3　不同嵌入率下载体图像与载密图像的 PSNR(dB)

	10%	30%	50%	70%	100%
图 7(a)	61.19	56.411	54.186 5	52.721 8	51.182 9
图 7(b)	61.191 4	56.418 2	54.191 9	52.713 1	51.160 7
图 7(c) B 分量	61.178 7	56.383	54.173 4	52.710 9	51.168 8
图 7(c) G 分量	61.151 3	56.405 3	54.182 8	52.731 8	51.169 7
图 7(c) R 分量	61.182 7	56.416 6	54.171 4	52.729 2	51.182 8
图 7(d) B 分量	61.14	56.39 1	54.195 7	52.731	51.183 3
图 7(d) G 分量	61.224 4	56.377 8	54.189 2	52.736 1	51.182 5
图 7(d) R 分量	61.183 7	56.412 8	54.178 6	52.726 4	51.176 5

从表 2 的实验结果可以看出, 无论是灰度图像还是彩色图像, 即使嵌入率为百分之百的情况下, RS 和 SPA 算法的估计结果仍然很好地保持在零附近, 近似于图像中没有嵌入消息, 这说明该嵌入算法有效地抵抗了 RS 和 SPA 隐写分析。一般来说, PSNR 低于 36dB 将使人眼明显觉察出图像的改动, 而表 3 中 PSNR 在不同嵌入率下始终保持在 51dB 以上, 说明载密图像具有良好的视觉效果。

在图像的直方图特征保持方面, 由图 7 的比较结果可直观地看出, 不论是灰度图像还是彩色图像的三个颜色分量, 即使是 LSB 平面以百分之百的比例嵌入消息, 载体图像与载密图像的直方图包络曲线都基本上重合, 这说明该算法不会对载体图像的直方图产生影响, 直方图统计特征得到了保持。

5　结论

通过结合 Arnold 置乱变换与改进的 LSB 嵌入方案, 可使信息伪装系统在消息嵌入量和失真度与传统的 LSB 嵌入算法保持一致的情况下, 获得更好的安全性。以置乱次数作为控制

消息嵌入和提取的密钥,同时以抗隐写分析的嵌入方案将消息嵌入到置乱的图像当中,这为消息的嵌入提供了抵抗隐写分析攻击和防止第三方提取这两个层次上的安全保障。从实验效果可以看出,从提高系统的安全性方面来讲,置乱变换可作为消息载体的一种有效的预处理手段,但由于置乱变换的运算量一般都比较大,因此算法的运算量要高于传统的 LSB 嵌入算法。在下一步的研究中将继续研究高效的置乱变换算法,提高算法的运算效率,此外,更深入地研究消息的嵌入过程,提出更为合理高效的预处理技术和嵌入算法也将是今后的努力方向。

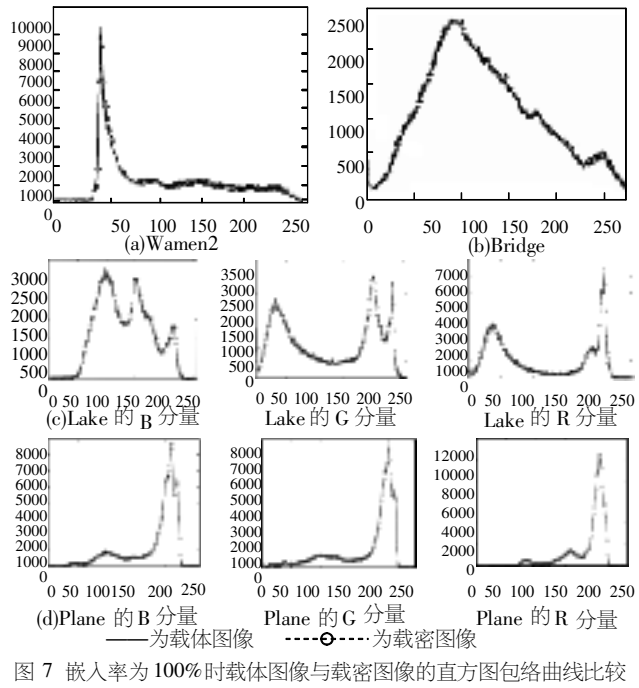

图 7 嵌入率为 100% 时载体图像与载密图像的直方图包络曲线比较

参考文献:

[1] abien A P Petitcolas, Ross J Anderson, Markus G Kuhn. Information Hiding: A Survey[J]. IEEE, Special Issue on Protection of Multimedia Content, 1999, 87(7): 1062-1078.

[2] Stefan Katzenbeisser, Fabien A P Petitcolas. 信息隐藏技术——隐写术与数字水印[M]. 吴秋新, 钮心忻, 杨义先, 等. 北京: 人民邮电出版社, 2001.

[3] Andreas Westfeld, Andreas P Tzmann. Attacks on Steganographic Systems[C]. Dresden: Proc. of the 3rd International Workshop on Information Hiding, 1999. 61-76.

[4] J Fridrich, R Du, L Meng. Steganalysis of LSB Encoding in Color Images[C]. New York City: Proc. of IEEE International Conference on Multimedia and Expo, 2000.

[5] J Fridrich, M Goljan, R Du. Detecting LSB Steganography in Color and Gray-Scale Images[J]. Magazine of IEEE Multimedia and Security, 2001, 22-28.

[6] S Dumitrescu, Xiaolin Wu, Zhe Wang. Detection of LSB Steganography via Sample Pair Analysis[A]. Proc. of the 5th International Workshop on Information Hiding[C]. LCNS 2578, Springer-Verlag, 2002. 355-372.

[7] Tao Zhang, Xijian Ping. A New Approach to Reliable Detection of LSB Steganography in Natural Images[J]. Signal Processing, Elsevier Science, 2003, 83(10): 2085-2093.

[8] F T Alturki, R M Mersereau. Secure Image Transform Domain Technique for Steganography Application[J]. SPIE: Security and Watermarking of Multimedia ContentsⅢ, 2001, 4314: 300-308.

[9] 齐东旭, 邹建成, 韩效宥. 一类新的置乱变换及其在图像信息隐蔽中的应用[J]. 中国科学(E 辑), 2000, 30(5): 440-447.

作者简介:

陈铭(1979-), 男, 云南个旧人, 硕士研究生, 主要研究方向为信号与信息处理、信息隐藏; 平西建(1953-), 男, 河南新乡人, 中国图像图形学会常务理事, 教授, 博士生导师, 硕士, 主要研究方向为图像信源编码理论与方法、图像处理与模式识别、计算机视觉、信息隐藏。

(上接第 215 页) 被其他设备发现的概率方程以及基于 NS2 的仿真实验,我们得出当设备处于查询或查询扫描的时间长度在 $[0, b]$ 间均匀分布时,b 值的取值应该大于点到点建立连接时的最大延迟 r_{max},这样可以增加在一定时间内发现的设备数量,从而缩短设备发现阶段的时间,提高散射网拓扑形成过程的效率。

同时在实验中我们也发现,在设备互相发现的过程中存在着重复发现的现象,这样给设备发现过程带来了很大的延迟,下一步的工作将重点放在如何减少这部分延迟上。

参考文献:

[1] alonidis T, Bhagwat P, Tassiulas L, *et al*. Proximity Awareness and Ad hoc Network Establishment in Bluetooth[R]. Technical Report, Institute of Systems Research (ISR), University of Maryland, 2001.

[2] Petrioli C, Basagni S, Chlamtac I. Configuring BlueStars: Multihop Scatternet Formation for Bluetooth Networks[J]. IEEE Transactions on Computers, 2003, 52(6): 779-790.

[3] Zaruba G V, Basagni S, *et al*. Bluetrees-Scatternet Formation to Enable Bluetooth-based Personal Area Networks[C]. Helsinki: IEEE International Conference on Communications, 2001. 273-277.

[4] Wang Z, Thomas R J, Haas Z. BlueNet: A New Scatternet Formation Scheme[C]. Big Island: Proceedings of the 35th Hawaii International Conference on System Science(HICSS-35), 2002. 779-787.

[5] Zaruba G V. Accelerated Neighbor Discovery in Bluetooth Based Personal Area Networks[C]. Proceedings of the 2002 International Conference on Parallel and Distributed Processing Techniques and Applications, CSREA Press, 2002. 1767-1773.

[6] Basagni S, Bruno R, *et al*. Device Discovery in Bluetooth Networks: A Scatternet Perspective[C]. Proceedings of the IFIP-TC6 Networking Conference, London: Springer-Verlag, 2002. 1087-1092.

[7] Zaruba G V, Gupta V. Simplified Bluetooth Device Discovery: Analysis and Simulation[C]. Proceedings of the 37th Hawaii International Conference on System Sciences, Washington: IEEE Computer Society, 2004. 307-315.

[8] Bluetooth SIG. Specification of the Bluetooth System, version 1.2 [EB/OL]. http://www.bluetooth.com, 2004-05.

[9] VINT. The NS Manual [EB/OL]. http://www.isi.edu/nsnam/ns/doc/index.html, 2004-05.

[10] Chia-Jui HSU, Yuh-Jzer Joung. An NS-based Bluetooth Topology Construction Simulation Environment[C]. Proceedings of the 36th Annual Simulation Symposium, Washington: IEEE Computer Society, 2003. 145-153.

作者简介:

肖雄仁(1978-), 男, 湖南长沙人, 硕士研究生, 研究方向为计算机网络、数据库技术; 李仁发(1957-), 男, 湖南宜章人, 教授、博士生导师, 主要研究方向为无线网络与移动计算、数字化实验技术、嵌入式计算; 付彬(1978-), 女, 广东英德人, 硕士研究生, 研究方向为无线网络。