

文章编号: 1001 - 9014 (2010) 02 - 0117 - 06

提高无线传感器网络信息安全的时间反演技术

李 德, 洪劲松, 王秉中

(电子科技大学 物理电子学院, 四川 成都 610054)

摘要:近年来无线传感器网络被广泛应用于三维立体监测、分布式监测、目标跟踪、空间探索、随机分布测量等领域。由于无线传感器网络在军事上的特殊用途,如敌情侦察、兵力监控及其它的特殊用途,使其信息传输的安全性研究得到广泛关注。通过引入一种新技术——时间反演 (TR, Time Reversal) 技术,来降低信号在空间与时间上被非法检测到的概率。时间反演技术使得信号只有在特定的时间和特定的空间内才可以被检测出来,而超出这个范围信号很难被检测出来,从而提高了无线传感器网络的信息安全。

关键词:时间反演;无线传感器网络;抗检测/截获性能;信息安全

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A

TME REVERSAL TECHNOLOGY FOR IMPROVING INFORMATION SECURITY IN WIRELESS SENSOR NETWORK

L I D e, H O N G J i n g - S o n g, W A N G B i n g - Z h o n g

(School of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: In recent years, wireless sensor networks (WSN) are widely applied to three-dimensional monitoring, distributed monitoring, target tracking, space exploration, random distribution of measurement and other fields. Information transmission security of WSN is attracting more attention of researchers because of the wide applications of WSN for military purpose during the last decade, such as enemy reconnaissance, strength monitoring, etc. In this study, time reversal (TR) technique as a new technology was utilized to reduce probability that the signals were illegally detected in space and time domains. TR technique allows signals to be detected only at a specific time and specific space, while in the other time and space the signals will be very difficult to be detected. Thus, TR technology enhances the information security of WSN.

Key words: time reversal (TR); wireless sensor network (WSN); anti-detection/interception performance; information security

引言

目前大多数无线传感器网络安全研究主要集中在物理层高效加密算法、数据链路层抗 DOS (Denial of Service) 攻击的安全 MAC (Media Access Control) 协议、网络层的路由安全协议以及应用层的密钥管理和安全组播等方面^[1]。尽管这些安全保障措施可以有效地提高系统的安全性,但还是无法避免网络信息在空间传播过程中被非法截取。由于 TR 技术的时空聚焦特性决定了只有在很小的空间范围和很窄的时间范围内,信号达到最强,而超出其空间聚

焦范围和时间聚焦范围,信号极其微弱^[2,3]。所以,TR 技术的这种时空聚焦特性具有极好的安全保密传输特性,这也是区别于传统无线传感器网络安全研究的一种新的方法。

1 基于 TR 技术的无线传感器网络

无线传感器网络中 TR 技术的基本原理是利用“一到多”和“多到一”的信道传输模式实现数据的无线传输^[4,5]。其具体实现可以分为三个步骤:首先,由信号源向周边多个传感器发送一个冲击信号 $p(t)$ (“一到多”传输),以确立空间传输信道的物理

收稿日期: 2009 - 03 - 12, 修回日期: 2009 - 09 - 14

Received date: 2009 - 03 - 12, revised date: 2009 - 09 - 14

基金项目: 国家高技术发展研究发展计划 (No. 2008AA01Z206); 国家自然科学基金项目 (No. 60872029); 国家留学基金委全额资助项目 (No. 2007106925); 电子科技大学 CRT 计划

作者简介: 李 德 (1985-), 男, 江苏宿迁人, 硕士生, 主要从事基于时间反演技术的无线传感器网络信息安全研究。

特性 (或者是获得空间物理信道的冲击响应特性), 如图 1(a)所示^[6,7];其次,周边的传感器对自身所接收冲击响应信号 $p(t) \otimes h_n(t)$ 进行数据“存储”;最后,周边的传感器分别将自身所接收的冲击响应信号以反向时间 $p(-t) \otimes h_n(-t)$ 进行发送和传输 (“多到一”传输),通过空间传播后,各信号重新汇聚于信源,构成无线传播信号的空间聚焦,如图 1(b)所示.同时,由于各个传感器所记录的信道响应已充分考虑了不同路径所引入的空间相位延迟以及非均匀介质所带来的影响,所以,来自周边各个传感器的信号除了能够在空间上汇聚于一点之外,而且还可以实现在同一时刻到达,即同时实现时间与空间上的聚焦.接收节点将接收到的信号为 $r(t) = i(t) \otimes p(-t) \otimes h_n(-t) \otimes h_n(t)$.正是由于 TR 技术能够在复杂的电磁环境中实现时空聚焦特性,使得信号在特定的时间和特定的空间内实现聚焦,这样就能够很好地解决网络信息在空间传播过程中被非法截取的问题.因此基于 TR 技术的无线传感器网络的安全性能将会有很大的提高.

2 抗检测/截获性能

由文献 [8,9]可知,检测技术主要是通过计算接收信号的能量与预先设定的门限做比较.当能量大于门限值就认为来波中有信号存在,反之能量小于门限值认为来波中没有信号存在.本文中的仿真所利用的信号是二阶高斯脉冲,是一种超宽带信号.对这种信号的检测需要用到宽带检测计来计算观测时间间隔内的能量.这种检测计的工作原理如图 2

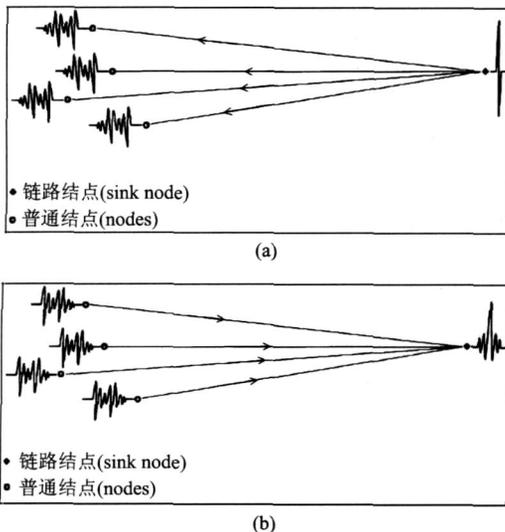


图 1 基于时间反演的无线传感器网络
Fig 1 Wireless sensor network based on TR technology

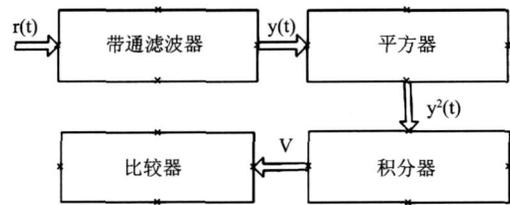


图 2 信号检测方框图
Fig 2 Signal detection block diagram

所示,首先,把来波 $r(t)$ 送入一个带宽为 W 的带通滤波器得到 $y(t)$,然后再将 $y(t)$ 送入一个平方器得到 $y^2(t)$,再通过一个积分时间为 T 的积分器就得到 V ,将 V 与比较器的门限 V_i 做比较.如果积分器的输出 V 比门限值 V_i 高就认为有信号存在,否则就认为没有信号存在.检测计的性能一般由检测率 p_d , 误警率 p_{fa} 和信噪比 SNR 来表征.

比较器门限值 V_i 的选择要满足误警率 p_{fa} 的要求,将得到的 V_i 带入式 (4),这样就得到了检测率 p_d 与信噪比的关系.给定一个检测率在不同的通信系统中对应不同的信噪比,得到的信噪比被认为是衡量通信系统隐蔽性的比较感兴趣的量.

当来波中没有信号存在时,功率谱密度为 $N_0/2$ 的加性高斯白噪声输入到辐射计中,把辐射计的输出量 V 对 $N_0/2$ 做归一化,则归一化随机变量 $Y = 2V/N_0$ 满足 $\nu = 2TW$ 个自由度的 χ^2 分布,这里的 T 为积分时间, W 为滤波器的带宽.

Y 的概率密度为:

$$p_n(y) = \frac{1}{2^{\nu/2} \Gamma(\frac{\nu}{2})} y^{(\nu-2)/2} e^{-y/2}, y > 0 \quad (1)$$

当来波中有一个在时间 T 内具有能量 E 的信号送入到辐射计时,随机变量 Y 服从 $\nu = 2TW$ 个自由度,非中心参数为 $\lambda = 2E/N_0$ 的非中心 χ^2 分布.

Y 的概率密度为:

$$p_{sn}(y) = \frac{1}{2} \left(\frac{y}{\lambda} \right)^{(\nu-2)/4} e^{-(y+\lambda)/2} I_{(\nu-2)/2}(\sqrt{\lambda y}), y > 0 \quad (2)$$

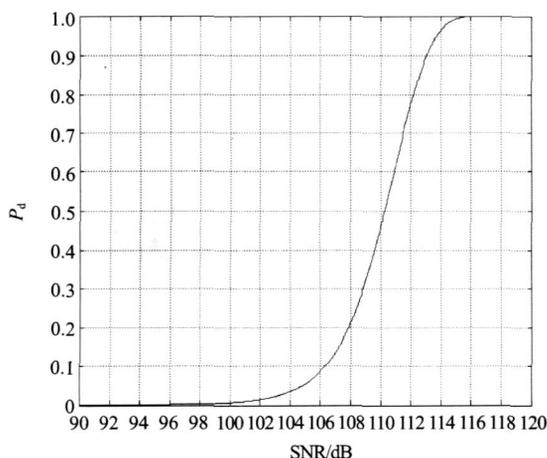
这里的 $I_n(z)$ 是第一类 n 阶修正 Bessel 函数.辐射计的 p_{fa} 和 p_d 值,以下面两个积分式来确定:

$$p_{fa} = \int_{V_i}^{\infty} p_n(y) dy \quad (3)$$

$$p_d = \int_{V_i}^{\infty} p_{sn}(y) dy \quad (4)$$

V_i 为报警门限值,比较器的输出就和它进行比较.

本文所用信号为 10dB 带宽为 880MHz 的二阶高斯脉冲,取积分器的积分时间为仿真的时间步长

图 3 P_d 与 SNR关系曲线Fig 3 Probability of detection P_d vs SNR

$2.5 \times 10^{(-11)}$ s, 误警率 P_{fa} , 将 $W = 880\text{MHz}$, $T = 2.5 \times 10^{(-11)}$ s, $P_{fa} = 0.001$ 带入上面的计算公式就可以得到检测率 P_d 与信噪比的关系如图 3 所示. 从图 3 中可以看出当信噪比小于 96dB 时信号就很难被检测出来, 而当信噪比大于 116dB 时信号的检测率为 1.

3 仿真过程与结果分析

数据由如图 4 所示的二维仿真空间 ($3\text{m} \times 6\text{m}$) 做了 6 组数值仿真实验得到. 这 6 组实验分别为:

1. 在仿真空间没有任何物体情况下“一对一”的时间反演通信, 首先, sink node (图 4 三角形点) 向 node (图 4 圆形点) 发送一个冲击信号, node 将接收到的信号做时间反演后再发回到 sink node; 2. 在图 4 室内环境下 node 与 sink node 之间的直接通信; 3. 与第 a 组实验类似, 只是在图 4 室内环境下进行“一对一”的时间反演通信实验; 4. 在图 4 室内环境下, 一个链路结点与两个普通结点之间的 TR 通信; 5. 在室内环境下, 一个链路结点与四个普通结点之间的 TR 通信; 6. 在室内环境下, 一个链路结点与八个普通结点之间的 TR 通信.

利用时域有限差分法计算空间各时刻的电磁分布. 图 5 为 sink node 收到信号时的空间电磁分布, 图 5(a) 与图 5(c) 对比可以看出, 当 sink node 接收到信号时, 实验 5 的空间聚焦特性要明显地比实验 4 的好. 这说明了时间反演技术能收集多径分量的作用, 使信号在同一时刻实现聚焦. 从图 5(b)、(c) 中可以看出, 在只有一个普通结点情况下, 时间反演通信与直接通信相比有明显的空间聚焦特性, 并且随着普通结点数量增加信号的空间聚焦特性越强,

利用时域有限差分法计算空间各时刻的电磁分布. 图 5 为 sink node 收到信号时的空间电磁分布, 图 5(a) 与图 5(c) 对比可以看出, 当 sink node 接收到信号时, 实验 5 的空间聚焦特性要明显地比实验 4 的好. 这说明了时间反演技术能收集多径分量的作用, 使信号在同一时刻实现聚焦. 从图 5(b)、(c) 中可以看出, 在只有一个普通结点情况下, 时间反演通信与直接通信相比有明显的空间聚焦特性, 并且随着普通结点数量增加信号的空间聚焦特性越强,

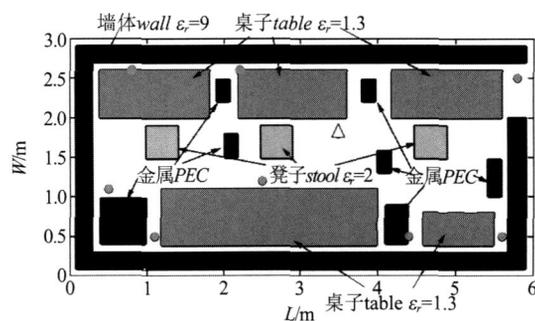


图 4 二维仿真空间

Fig. 4 Two-dimensional simulation space

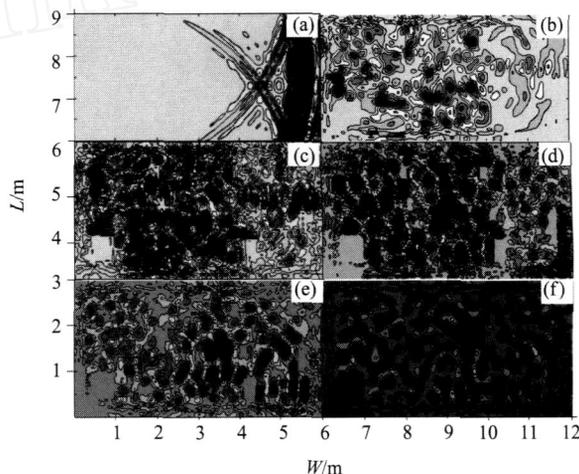


图 5 sink node 接收到信号时的空间电磁分布

Fig. 5 Spatial distribution of electromagnetic as sink node receives the signal

这一时刻空间的电磁能量主要集中在 sink node 这一点, 如图 5(c) ~ (f) 所示.

取 sink node 处的信噪比为 116dB 也就是这一点的检测率为 1, 在由 $\text{SNR} = 10 \lg(2V/N_0)$ 算出整个空间的噪声功率谱密度 $N_0/2$ 把这一时刻空间的能量分布计算出来, 然后将空间所有点的能量对 $N_0/2$ 做归一化, 这样就得到了整个空间在这一时刻的信噪比分布如图 6 所示. 在由式 (4) 就可以计算出检测率与空间的位置关系如图 7 所示. 从图 6 可以看出在引入时间反演以后在 sink node 处的信噪比明显的比其他地方要高, 而在直接通信情况下就不会有这样的效果如图 6(b) 所示. 从图 7 可以看出, 在保证 sink node 能接收到信号的情况下, 引入时间反演技术与直接通信相比对信号的安全传输有较大的影响. 在直接通信情况下, 当 sink node 接收到信号的时候, 而在空间其它的许多地方也能够检测到信号的存在, 这样就大大提高了信号在空间传播时被

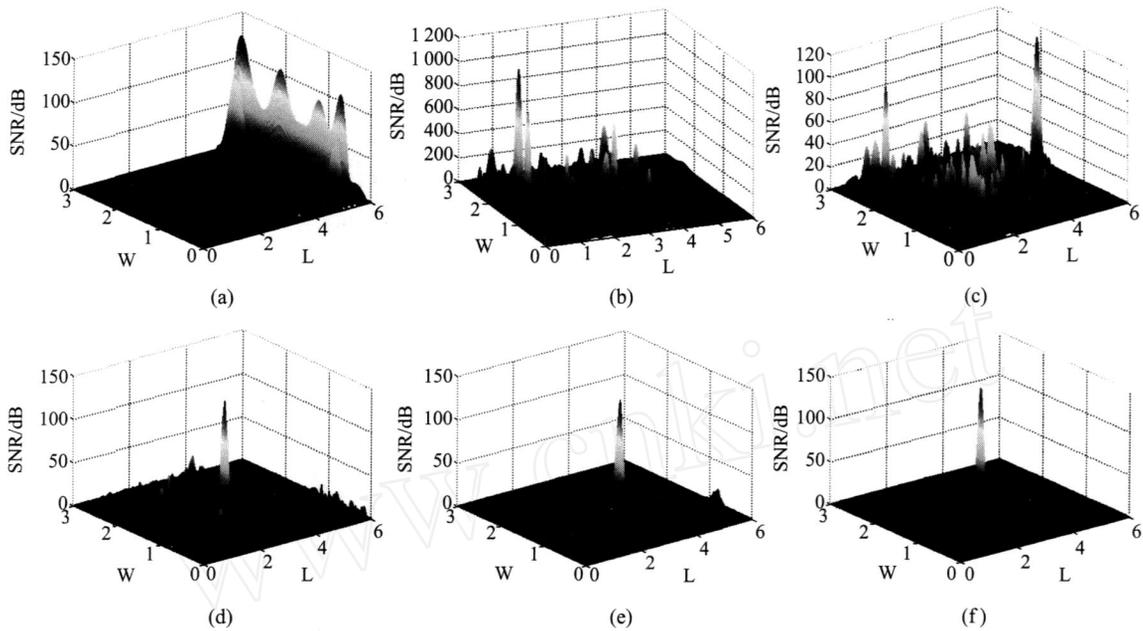


图 6 sink node 接收到信号时的空间信噪比分布
 Fig.6 Distribution of SNR in the space as sink node receives the signal

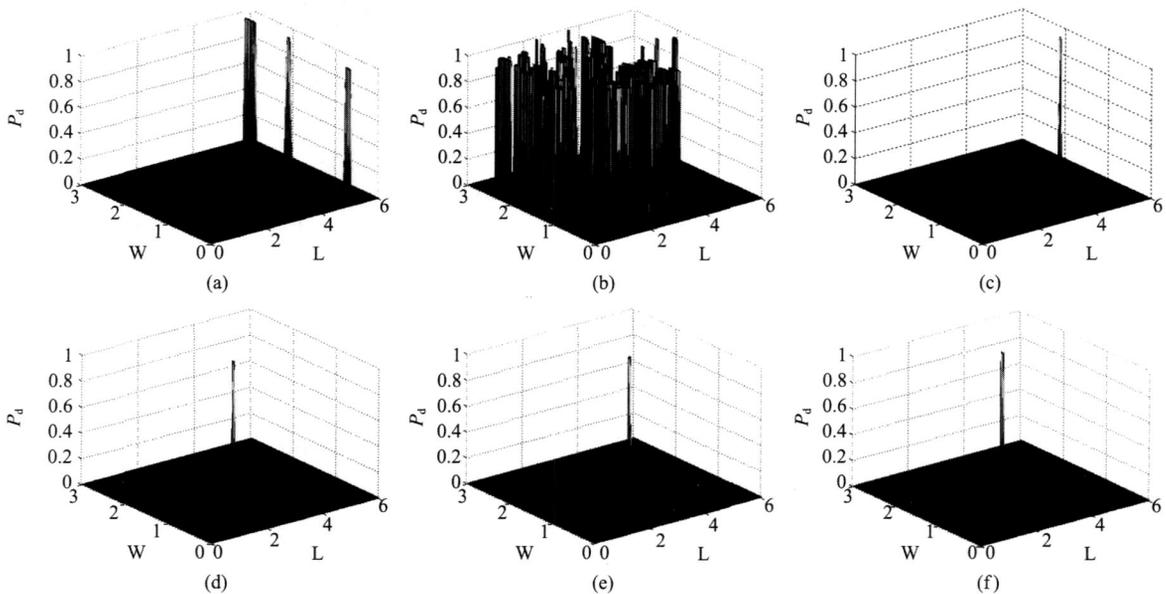


图 7 sink node 接收到信号时的空间检测率分布
 Fig.7 Distribution of probability of detection in the space when sink node receives the signal

非法检测到的概率,不利于信息的安全传输;当引入时间反演技术后情况就大不一样了,只有 sink node 周围在很窄的范围内能够检测到信号的存在,而超出这个范围就检测不到信号的存在,这样就降低了信号在空间传播时被非法检测的概率,提高了信息的安全传输.说明了时间反演技术的空间聚焦特性能够提高无线传感器网络的信息安全.

下面分析时间反演技术的时间聚焦特性对无线传感器网络的信息安全传输的影响.假设空间每个点上都有信号检测装置,把每个时刻的空间能量最大值对上述 $N_0/2$ 做归一化处理这样就得到了图 8,空间最大信噪比随时间的变化曲线.从图 8 (a)、(c)、(d)可以看出,当普通结点的数量比较少的时候时间反演通信的时间聚焦特性并不明显,但是随

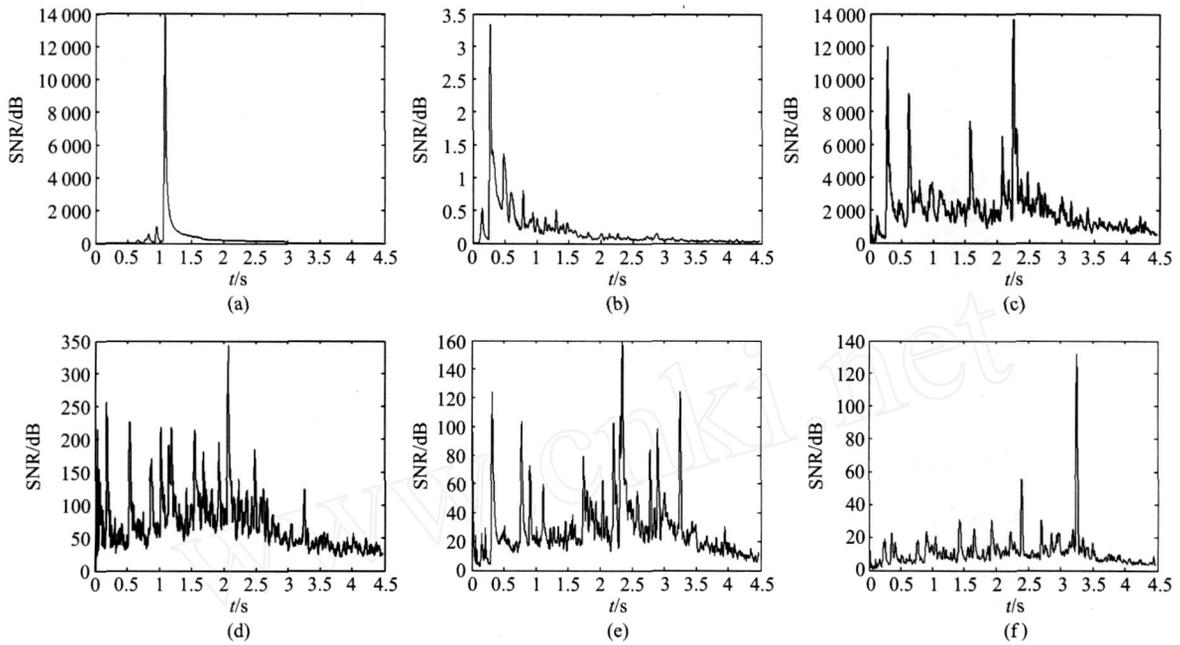


图 8 空间最大信噪比随时间的变化
 Fig. 8 The largest SNR in the space changes with time

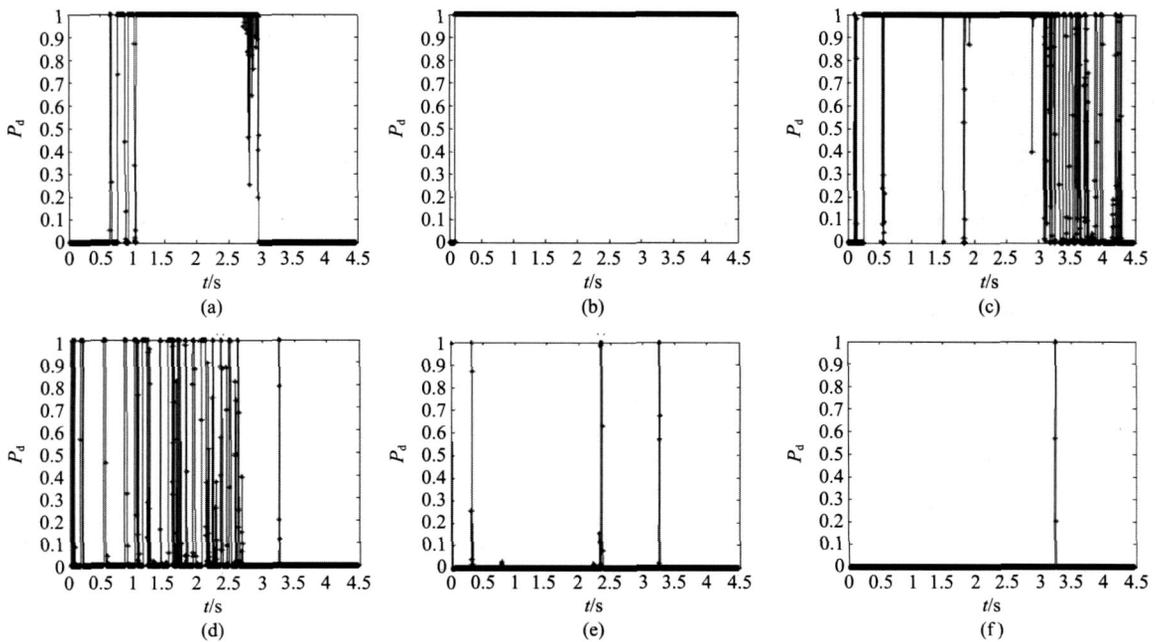


图 9 检测率随时间的变化
 Fig. 9 Probability of detection changes with time

着普通结点数量的增加,时间聚焦特性越来越明显. 如图 8(f)所示, $3.25 \times 10^{(-8)}$ s附近的峰值就是由于时间反演的聚焦特性引起的. 为了进一步分析检测率 (P_d)与时间的关系,将得到的每个时刻空间最大信噪比带入式(4),就可以得到相应的 P_d 与时间的

关系,如图 9所示. 当没有引入 TR时,信号在发射初期一直到仿真结束这段时间里信号都是可以检测出来的,而当引入时间反演技术后随着普通结点数量的增加能够接收到信号的时间在减少,当普通结点数量达到一定值后从图 9(f)可以看出,信号在

整个传输过程中,只有在时间反演聚焦时刻才可以被探测出来,而在其它时间里信号是很难被检测出来的.从而,说明了时间反演技术的时间聚焦特性降低了信号在时间上被非法截取的概率,提高了无线传感器网络的信息在空间传播的安全性.

4 结论

时间反演技术的时-空间聚焦特性能够提高无线传感器网络信息在空间传播的抗检测/截获性能,降低了信号在空间被非法截取的概率,提高了无线传感器网络的信息在空间传播的安全性.

REFERENCES

- [1] Pathan A S K, Lee H W, Hong C S. Security in wireless sensor networks: issues and challenges[J]. *IEEE*, 2006, **2**(3): 1043—1048.
- [2] Fink M. Time reversal of ultrasonic fields—part I: basic principles[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 1992, **39**(5): 555—566.
- [3] Fink M. Time reversal of ultrasonic fields—part II: basic principles[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 1992, **39**(5): 567—578.
- [4] ZHANG Guang-Min, HONG Jing-Song, WANG Bing-Zhong. Advances in the research of rectenna of wireless sensor network[J]. *Telecommunications Science* (张光旻, 洪劲松, 王秉中. 无线传感器网络中的整流天线技术研究进展. *电信科学*), 2007, **4**(7): 59—65.
- [5] Barton R J, Chen J, Huang K, et al. Optimality properties and performance analysis of co-operative time-reversal communication in wireless sensor networks[J]. *IET Commun*, 2007, **1**(1): 64—70.
- [6] Barton R J, Zheng R. Order-optimal data aggregation in wireless sensor networks using cooperative time-reversal communication[J]. *IEEE*, 2006, **7**(6): 1050—1055.
- [7] Qiu R C, Zhou C M, Zhang J Q, et al. Channel reciprocity and time-reversed propagation for ultra-wideband communications[J]. *IEEE Antennas and wireless Propagation letters*, 2006, **5**(1): 269—273.
- [8] Mills R F, Prescott G E. A comparison of various radiometer detection models[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1996, **32**(1): 467—473.
- [9] WANG Dang-Wei, MA Xin-Yi, WANG Shao-Gang, et al. New approach to radar target identification using a generalized likelihood ratio test[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves* (王党卫, 马兴义, 王少刚, 等. 一种基于广义似然比检测的雷达目标识别新方法. *红外与毫米波学报*), 2006, **25**(4): 311—315.
- [7] Wright M G, Ahmed N, Koohian A, et al. Far-infrared optically detected cyclotron resonance observation of quantum effects in GaAs[J]. *Semicond Sci Technol*, 1990, **5**(5): 438—441.
- [8] Hai P N, Chen W M, Buyanova I A, et al. Direct determination of electron effective mass in GaNAs/GaAs quantum wells[J]. *Appl Phys Lett*, 2000, **77**(12): 1843—1845.
- [9] Dagnelund D, Vorona I, Wang J, et al. Optically detected cyclotron resonance studies of $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}/\text{GaAs}$ quantum wells sandwiched between type-II AlAs/GaAs superlattices[J]. *J. Appl Phys*, 2007, **101**(7): 073—705.
- [10] Kioseoglou G, Cheong H D, Yeo T, et al. Reflectance-based optically detected resonance studies of neutral and negatively charged donors in GaAs/Al_xGa_{1-x}As quantum wells[J]. *Phys Rev B*, 2000, **61**(8): 5556—5561.
- [11] Mani R G, Smet J H, Von Klitzing K, et al. Zero-resistance states induced by electromagnetic-wave excitation in GaAs/AlGaAs heterostructures[J]. *Nature*, 2002, **420**(6916): 646—650.
- [12] Dmitriev I A, Mirlin A D, Polyakov D G, et al. Cyclotron-resonance harmonics in the ac response of a 2D electron gas with smooth disorder[J]. *Phys Rev Lett*, 2003, **91**(22): 226802.
- [13] Ashkinadze B M, Voznyy V, Cohen E, et al. Condensation of bulk excitons on a magnetized two-dimensional electron gas in modulation-doped heterojunctions[J]. *Phys Rev B*, 2002, **65**(7): 073311.
- [14] Chen W M, Monemar B, Soman E, et al. Effect of a hot two-dimensional electron gas on optical properties of modulation-doped GaAs/AlGaAs heterostructures[J]. *Semicond Sci Technol*, 1992, **7**(3B): B253—B255.
- [15] Ando T. Self-consistent results for a GaAs/Al_xGa_{1-x}As heterojunction. I. Subband structure and light-scattering spectra[J]. *J. Phys Soc Jpn*, 1982, **51**(12): 3893—3899.
- [16] Moreau S, Byszewski M, Sadowski M L, et al. Optically detected cyclotron resonance in a high mobility 2D electron gas[J]. *Physica E*, 2006, **32**(1-2): 203—206.

(上接 90页)