

无线传感器网络 MAC 层节能广播协议

张 韬 陈力军 陈道蓄

(南京大学计算机软件新技术国家重点实验室 南京 210046)

(南京大学计算机科学与技术系 南京 210046)

摘 要 在无线传感器网络中,使节点休眠是一种有效的节能方式。很多较新的 MAC 协议都采用定期休眠的机制进行节能,如 B-MAC、VPCC、X-MAC、A-MAC 等。这些协议并未针对广播进行设计,使得发送广播需要消耗较多能量,而且易于发生隐藏节点引起的冲突。提出了适用于休眠传感器网络的节能广播协议。该方法中广播报文以随机间隔进行重传,能够保证异步休眠的节点接收到广播数据;在产生隐藏节点冲突问题时,随机间隔的机制能够使相互干扰的报文较快分离,降低报文冲突的干扰。通过 NS-2 模拟,验证了广播协议的节能性和高效性。

关键词 无线传感器网络,MAC 层,广播协议

中图法分类号 TP393 **文献标识码** A

Energy Efficient MAC Layer Broadcast Protocol for Wireless Sensor Networks

ZHANG Tao CHEN Li-jun CHEN Dao-xu

(State Key Laboratory for Novel Software Technology, Nanjing University, Nanjing 210046, China)

(Department of Computer Science and Technology, Nanjing University, Nanjing 210046, China)

Abstract Sleeping is an efficient energy saving approach in wireless sensor networks. Many state of art communication protocols have been designed with periodically sleeping schedule, such as B-MAC, VPCC, X-MAC, A-MAC and so on. In these protocols, broadcast scheme is not proposed or works with large energy consumption and is seriously affected by hidden node problem. An energy efficient broadcasting scheme for the asynchronously sleeping wireless sensor networks was proposed. In this approach, the broadcast data are retransmitted multiple times with random interval. This approach guarantees that the receivers can receive the broadcast data whenever they wake up. When hidden nodes and the broadcast packets are interfering with each other, the random interval can separate the packets earlier. We tested our approach with NS-2 simulation. The experiment results show that our broadcast scheme can reduce the energy consumption significantly and reduce the impact of interference.

Keywords Wireless sensor networks, MAC layer, Broadcast protocol

1 引言

降低能耗、延长网络寿命是传感器网络研究的重要课题。在传感网中,通信消耗了传感器节点大量的能耗。设计并实现高效节能的通信协议对降低节点能耗起着至关重要的作用。有大量工作关注于无线传感器网络 MAC 层通信协议^[1]的研究。然而,在 MAC 层通信机制的研究中,往往只关注于节能单播协议的设计,忽略了对广播的设计。我们对低功耗 MAC 协议中的广播协议进行研究,设计适合于无线传感器网络的 MAC 层广播协议,在节能的同时,降低由广播所造成的报文冲突,使得整个网络更为高效。

在无线传感器网络通信协议研究中,休眠和功率控制是两大主要节能手段。在采用休眠策略的传感器网络中,节点将定期进行休眠,节约长时间空闲监听所造成的能耗。在采

用功率控制的网络中,通过短距离多跳传输代替长距离单跳传输来降低数据传输能耗。以基于 IEEE 802.15.4 标准的 MICAz^[2]节点为例,对两种方式的节能效果进行了测试。MICAz 节点采用 CC2420 无线收发器,其工作能耗如表 1 所列。

表 1 CC2420 无线收发器工作参数表

工作状态	工作电流	备注
休眠	20uA	
空闲监听	19.7mA	
接收数据	19.7mA	
最大功率发送	17.4mA	通信半径 70m
最小功率发送	8.5mA	通信半径 25cm

我们测试了节点采用最大和最小功率发送数据时的通信半径,发现在发送功率相差约一倍的时候,通信半径相差约 280 倍。在此情况下,通过多跳短距离传输并不能获得良好

到稿日期:2012-03-16 返修日期:2012-06-14 本文受国家重点基础研究发展计划 973 项目(2006CB303000,2009CB320705),国家自然科学基金面上项目(60873026,61021062),江苏省科技支撑计划(工业)项目(BE2010178),江苏省高校科研成果产业化推进工程项目(JH10-3)资助。
张 韬(1982-),男,博士生,主要研究方向为无线传感器网络;陈力军(1961-),男,教授,主要研究方向为分布式计算、无线传感网,E-mail:chenlj@nju.edu.cn(通信作者);陈道蓄(1947-),男,教授,CCF 会员,主要研究方向为分布式计算、并行计算、计算机网络。

的节能效果,而节点休眠时能耗极低,约是正常工作时的千分之一,可以达到良好的节能效果。在 MAC 层,多采用基于休眠机制的节能通信策略。因此,在采用基于休眠策略通信方式的基础上,设计高效节能的 MAC 层广播通信机制。

2 相关工作

目前,有多种基于休眠策略的 MAC 层通信协议,如 S-MAC^[3]、SCP-MAC^[4]、B-MAC^[5]、VPCC^[6]、X-MAC^[7]、A-MAC^[8]等。在这些协议中,节点都会定期唤醒和休眠,以较低的监听能耗保障数据的正常传输。在采用休眠策略的网络中,节点休眠时无法接收数据,接收节点需要在有数据需要接收的时候及时唤醒,而发送节点需要在目标节点唤醒时传输数据。如何协调发送和接收节点的唤醒时间是采用休眠策略通信机制需要解决的重要问题。有些协议要求同步机制的支持,使各节点在同一时间唤醒工作,或者能精确判断目标节点唤醒的时间,从而在约定时间进行数据传输,如 S-MAC 和 SCP-MAC 等。然而精确的同步机制本身会给节点造成较大负担。节点的物理时钟无法达到绝对同步^[9],而且越高的同步精度需要消耗节点越多的计算能力,节点间也将产生越多的数据交换^[10]。然而在无线传感器网络中,节点计算能力较为有限,精确的同步机制对节点来说负担较大。在 S-MAC 协议中,节点采用统一的休眠策略,收发节点在同一时刻唤醒,监听信道并进行数据传输。T-MAC 在 S-MAC 基础上加入了动态机制,使得节点的监听时长能够按照需要动态调整。同时 T-MAC 采用提前通知的方式使得下一跳接力节点能够及时唤醒,减小了多跳传输的延迟。而 SCP-MAC 在高度同步机制保障的基础上极大地缩短了监听时间,使得协议的节能性有了极大的提高,同时也由于对同步有较强的依赖,使得系统的负荷较大。

为降低节点对同步机制的依赖,对基于休眠策略的异步 MAC 通信协议也有较多的研究,如 B-MAC、VPCC、X-MAC 和 A-MAC 等。在这类网络中,节点定期进行休眠,但节点无法得知网络中其他节点的准确唤醒时间。为保证数据准确传输至目的地,往往采用低功耗监听策略或类似方式进行数据传输。在低功耗监听策略中,发送节点传输一个较长的前导信号随后传输数据报文,以确保目标节点在唤醒时能接收到前导信号,并保持监听直至接收到数据。B-MAC 协议在传输数据时沿用了传统 LPL 策略,会发送一个较长前导信号。然而有些无线收发设备以报文为单位进行传输,无法发送过长的前导信号,如基于 IEEE 802.15.4 协议的 CC2420 无线收发器等,而且长前导码也大大增加了发送者的能耗和串扰所带来的额外开销。VPCC 以及 X-MAC 对这种方式进行了改进,将过长的前导码切分成若干小报文片。与 VPCC 不同,X-MAC 在每个小报文片中加入接收者信息,接收者在收到任一报文片之后即回复 ACK 报文通知发送者传输数据,减少了前导报文的发送次数,降低了发送能耗和延迟。而在 A-MAC 中,发送节点不直接发送前导报文,而是保持监听信道,由节点在唤醒时向邻居发送通知报文。发送节点接收到目标节点报文后进行发送。

在异步 MAC 通信协议中,未对广播机制进行特别设计。

而为了支持上层路由协议^[11],广播是必不可少的基础功能之一。在 B-MAC、VPCC 协议中,采用类似低功耗监听策略进行数据传输,无论是单播报文还是广播报文,发送节点的所有邻居都能够收到其发送的数据,无需特别设计广播机制,但这种方式能耗较大,接收节点必须接受大量冗余前导信号。而 X-MAC 为降低传输能耗,对单播策略进行优化,采用接收节点发送 ACK 报文回复的方式减少前导报文的发送量。这种接收节点主动回复的方式在单播中较为有效,但在有众多接收节点的广播中并不适用,无法要求所有节点有序地回复 ACK 报文来获取数据。A-MAC 在发送广播报文时需要事先知道所有邻居节点信息,并在其唤醒时传输数据,相当于多次发送单播报文,其效率和灵活性较差。

我们针对定期休眠的异步 MAC 通信协议设计了高效节能的广播协议,在保障数据传输的同时节约了节点的传输能耗。在我们的广播机制中,节点无需利用前导信号通知邻居节点,也无需邻居节点回复 ACK 报文来获取数据,而是由发送节点不断重传数据报文,使得邻居节点在唤醒时能够收到其中的一个报文,无需长时间监听前导信号,从而节约大量监听能耗。数据报文间的重传间隙随机变化,以降低隐藏节点问题所造成的报文干扰影响。我们在 NS-2^[12] 模拟实验环境中对协议性能进行了验证。结果显示,本协议能有效降低报文冲突所造成的影响,减少广播报文的收发能耗。

3 广播协议设计

在无线传感器网络 MAC 层通信协议设计中,异步低功耗监听策略能够起到较好的节能效果。在该策略中,节点通过定期休眠和唤醒来降低工作时的监听能耗。在此基础上,针对定期休眠的无线传感器网络设计高效节能的广播通信机制。在现有的通信机制中,可用于广播协议的解决方案有两种:1) 发送较长的前导信号,随后传输数据报文,如图 1 所示的 B-MAC;2) 以多个短小的前导报文代替 B-MAC 中较长的前导信号,如图 2 所示的 VPCC。前者无法应用于 IEEE 802.15.4/ZigBee 系列的无线通信,而 IEEE 802.15.4/ZigBee 目前已广泛应用于传感器网络的无线通信之中。后者虽能适用于 IEEE 802.15.4/ZigBee,但其要求接收者监听一段较长的无用信号,浪费了较多的能量。

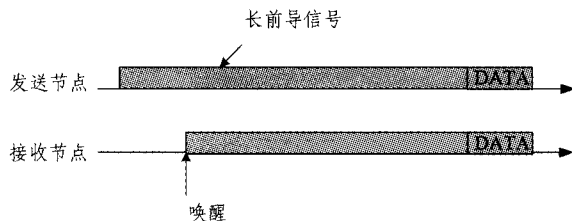


图 1 B-MAC

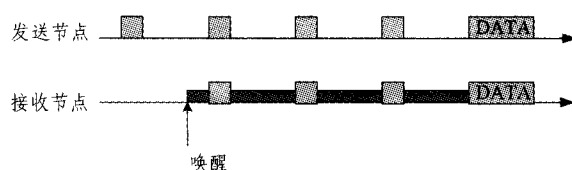


图 2 VPCC

在单播策略中,为弥补监听时间过长的缺陷,引入了ACK 应答机制,缩短了接收节点的监听时间。而在广播协议中,由于目标众多而且不确定,无法使用应答机制进行数据传输。在此,采用重复传输数据报文的方式进行广播数据的发送,如图3所示。假定在定期休眠的网络中,节点休眠时间为 T_s ,唤醒监听时间为 T_l 。两次广播报文传输的间隔为 T_i ,一个广播报文的持续时间为 T_a ,广播报文总的传输时间为 T_b 。为保证邻居节点能够收到其中一次的广播报文,必须满足 $T_i \leq T_l$ 以及 $T_b - T_a \geq T_s$ 。前者保证节点在唤醒时不会处于两次发送的间隙从而错过接收数据,后者保证节点唤醒时不会因数据发送结束而错过接收数据。在此,将重传间隔固定为 $T_i = T_l$,称此协议为固定重传间隔的广播协议(BCAST-FIX)。

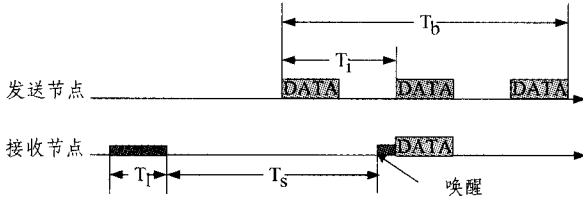


图3 基于报文重传的广播协议

在固定重传间隔的广播协议中,当没有报文冲突时,可以很好地完成传输。但是网络中可能存在隐藏节点问题,即一个节点的若干个邻居彼此不相邻,这几个邻居节点无法探测到对方的数据传输,可能会同时发送数据,从而造成冲突。如图4所示,节点 S_1 、 S_2 和 S_3 是节点 R 的邻居。它们都能和节点 R 通信,但是由于通信距离的限制,不能和其他节点通信,也无法探测到其他节点传输的信号。在固定重传间隔时,一旦在某一次传输时发生冲突,在其后每一次重传都会发生冲突,从而严重影响干扰区域内节点的数据接收。此时,接收节点必须保持监听,等待冲突结束,并且只能接收到其中的一个广播,如图5(a)所示。RTS/CTS报文交互通常用来解决隐藏节点问题,但是在异步休眠的网络中,RTS/CTS报文无法保证及时被邻居节点接收,以及及时探测到隐藏节点的数据传输,而且RTS/CTS不适用于广播报文的传输。

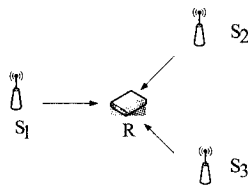


图4 隐藏节点问题

为解决广播报文冲突问题,对基于数据重传的广播协议进行了进一步改进,即将原来的固定的重传间隔改为动态随机变化的重传间隔,以减少报文冲突。在固定重传间隔BCAST-FIX策略中,将重传间隔设置为 $T_i = T_l$ 。此处,将重传间隔以同等概率设置为 $T_l/2$ 或 T_l 。如图5所示,当重传间隔固定时,一旦发生报文冲突,接收者就无法正确识别冲突报文,只能保持监听,直到冲突结束。这样,就浪费了大量的监听能耗。当采用随机重传间隔时,相互干扰的两个报文可以较早进行区分,使接收者较早结束监听。在监听结束时,只区分了其中一个广播报文,为提高广播报文的接收成功率,此

时不再休眠一个完整的周期 T_s ,而是在 $(0, T_s)$ 间随机选择一个休眠周期。经实验测试,随机休眠的方式能够提高8%的报文接收成功率,而仅增加2%的能耗。由于广播重传间隔是随机选择的,我们将此策略称为随机重传间隔的广播协议(BCAST-RND)。

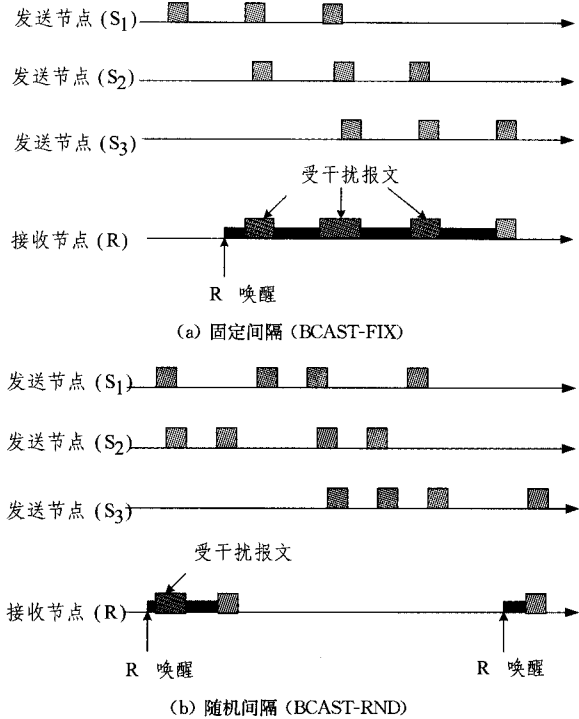


图5 广播报文冲突

当有 n 个广播报文发生冲突时,在满足 $T_l/2 \leq T_a \times n$ 即 $T_l \leq 2nT_a$ 时,原本冲突的 n 个发送者在其中选择 $T_l/2$ 为下一次重传间隔,其他发送者选择 T_l 为重传间隔时能够在下一次进行区分。若监听时间较短,即重传间隔较小,会影响冲突报文的区分,但实验表明,随机确定重传间隔的策略仍然能对报文进行较好的区分。在IEEE802.15.4规范中,传感器节点传输速率为250kbps,最大报文长度为128字节,即报文持续时间最长为4.096ms。当报文长度为20字节时,传输时间仅为0.64ms。在X-MAC实验中,节点监听时长为20ms。在实际实验中,将监听时长缩短至10ms,进一步压缩时间较难维持稳定运行。这一般情况下能满足区分报文的条件。

假设节点 A 和 B 是两个互不相邻的发送节点,两者的广播报文在某次重传中发生了冲突。在采用随机间隔时,对于 A 和 B ,在其选择不同的传输间隔时,能够在下一次传输时区分出其中的一个数据,即以 $1/2$ 的概率在下次重传进行区分。在 n 次重传之后,有 $1 - (1/2)^n$ 的概率进行区分。而对于其中的某一个发送者 A ,在下次发送时区分出 A 所发送的数据需要满足如下两个条件之一:1) A 选择 $T_l/2$ 作为传输间隔,而 B 选择 T_l 作为传输间隔;2) A 选择 $T_l + T_a$ 作为传输间隔,而 B 连续选择 $T_l/2$ 和 T_l 作为传输间隔。即对于其中特定的发送者,有 $3/8$ 的概率在下次传输中被区分出。

4 实验验证

在NS2模拟环境中实现了本协议,并对协议性能进行了深入验证。作为对比,我们实现了VPCC协议。B-MAC和

VPCC 都能实现广播,但两者通信机制相类似。VPCC 将 B-MAC 中连续的前导信号划分为多个短小的前导报文,在适应于 IEEE 802.15.4 协议的同时具有较小的发送能耗,所以此处仅与 VPCC 广播协议相比较。我们同时实现了固定重传间隔的广播协议 BCAST-FIX 和随机重传间隔的广播协议 BCAST-RND 来比较随机间隔对广播的影响。在实验中,设定休眠时间为 $T_s=500\text{ms}$ 。监听时间 T_l 选取 10ms 和 20ms,观察不同监听时间对协议性能的影响。

在 $500\text{m} \times 500\text{m}$ 的区域内随机部署 100 个传感器节点,每个节点的通信半径设置为 100m,节点每 60s 发送一次广播。为测试节点区分冲突报文的能力,令网络中的节点在同一时刻同时开始广播数据,相邻节点由于能够探测到邻居的数据传输,可以通过退避避免冲突,而隐藏节点之间的报文传输则会产生冲突。观察网络中节点的负荷比和数据接收率。数据接收率定义为网络中节点实际收到的广播报文总数与预期收到的报文总数的比值。如一个发送节点有 10 个邻居,其中 6 个接收到广播报文,则数据接收率为 60%。数据接收率越高,表示网络中报文冲突越少,广播报文传输的效果越好。

首先对网络中节点能耗进行了测试。在定期休眠的网络中,一般用负荷比来衡量节点的能耗,即节点处于唤醒工作的时间与总时间的比值。采用不同广播协议的传感器节点平均负荷比如图 6 所示。我们可以观测到,在采用 VPCC 的网络中,由于接收者收到前导报文后必须保持监听,等待数据报文的传输,因此其能耗比 BCAST-FIX 和 BCAST-RND 广播协议要高出很多。相比于 VPCC,BCAST-FIX 使得接收节点能够较早地接收到数据,从而尽早转入休眠降低能耗,因此能耗降低了约 30%~47%。在 BCAST-RND 协议中,广播数据的发送次数比 BCAST-FIX 略多,发送能耗有一定的增加,但其能较好地处理广播报文的冲突,使得节点能够更早地区分相互干扰的报文,较早结束数据接收,使得总体能耗比 BCAST-FIX 降低约 10%~20%。在 VPCC 协议中,节点能耗几乎不受广播报文大小的影响,因为主要能量消耗在前导报文的传输和监听上,而真正的数据传输和接收的能耗所占比重较低。而在 BCAST-FIX 和 BCAST-RND 协议中,通过重复发送数据报文进行传输,因此,其能耗随着报文长度的增加而增加。

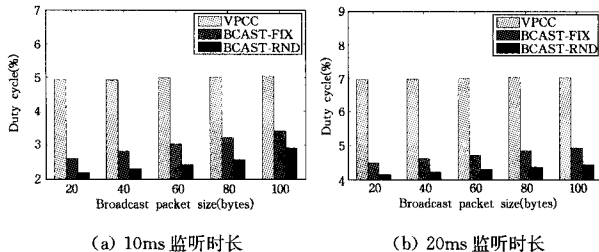


图 6 广播报文长度变化时的节点平均负荷比

图 7 展示了各协议的数据接收率。可以发现,BCAST-FIX 协议的数据接收率比 VPCC 提高了约 10%,因为 BCAST-FIX 协议通过重传广播报文进行传输,当多个发送者的广播报文在某一段发生冲突时,冲突段之前和之后的报文互不干扰,节点有机会接收到互相冲突的两个报文。而 VPCC 只在前导报文发送完毕之后传输数据报文,一旦发生干扰,先发送的广播报文必然处于冲突中,无法进行区分,因

此数据接收率较低。BCAST-RND 的数据接收率比 BCAST-FIX 提高了约 20%,显示了 BCAST-RND 在区分冲突报文时有较好的效果。在 BCAST-RND 中,节点成功收到数据报文后将转入休眠,并不等待成功接收到所有相互干扰的报文,对数据接收率有一定的影响。在两个发送者同时传输时,BCAST-RND 与 BCAST-FIX 相同,也只能区分出其中 1 个数据报文。但当相互冲突的发送者多于两个时,BCAST-FIX 只能接收到最后结束的广播报文,而 BCAST-RND 可以较早地接收到其中一个报文,在休眠之后再次接收其他报文,从而提高了数据接收率。我们注意到,数据接收率受报文长度以及监听时长的影响较小,只是在监听时长为 $T_l=10\text{ms}$,报文长度为 100 字节时有所降低。此时报文长度较长,而重传的间隔较短,不利于报文的区分,但性能仍然明显优于其他协议。

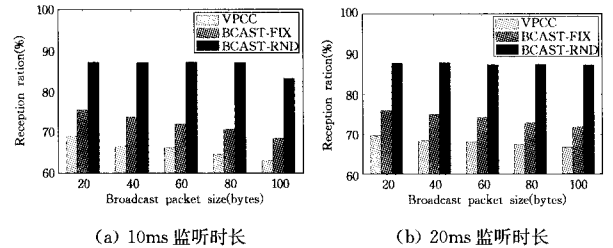


图 7 广播报文长度变化时接收成功率

一个较为常见的广播报文应用是网络路由的初始化过程。由某一个节点发起广播,将本地信息传递到其他节点,由其他节点建立相应路由,并进一步广播信息至网络其他部分,直到整个网络路由完全建立。我们实现了一个建立最小跳路由的应用,以测试协议在此类实际应用场景中的性能。我们在 $500\text{m} \times 500\text{m}$ 的网络中部署 100 个节点,其中 1 个是基站节点。基站节点 s_0 的跳数初始为 $h_0=0$,而其他节点 s_i 将自身跳数初始为 $h_i=INVALID$ 。由基站节点发起建立最小跳路由的广播,其中包含了本节点的跳数信息(0 跳)。当节点 s_i 接收到广播信息后,对比自身的跳数 h_i 和接收到的广播报文中的跳数 h_r 。当 $h_i=INVALID$ 或者 $h_i > h_r + 1$ 时,接收者将更新自身的跳数为 $h_i = h_r + 1$,然后将此时自身的跳数信息广播,否则,接收者将忽略广播报文。将测试整个路由建立过程所耗费的时间、负荷比、数据接收率以及最终路由信息的误差。路由信息的误差 (Err) 由节点到基站的真实最小跳数 H_i 以及路由建立完毕后节点所认为的最小跳数 h_i 差值的平均值来衡量,即误差 $Err = \sum |H_i - h_i| / N$ 。

如表 2 所列,BCAST-RND 性能明显优于其他协议,虽然 VPCC 的路由建立时间比 BCAST-FIX 短 32%,但 VPCC 所建立路由的误差要远大于 BCAST-FIX,因为 VPCC 丢失了较多的报文,虽然缩短了路由建立的时间,但精确度得不到保障。而 BCAST-RND 在各方面的性能都好于其他协议,适用于实际应用场景。

表 2 建立最小跳路由应用中的广播测试

Protocol	Duration	Duty cycle	Rec. ratio	Avg. error
VPCC	13.09s	33.04%	77.1%	0.27
BCAST-FIX	19.15s	10.26%	85.8%	0.06
BCAST-RND	12.11s	9.94%	88.5%	0.02

(下转第 62 页)

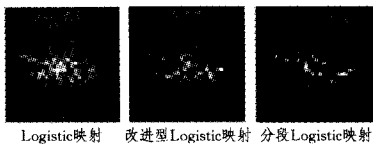


图 10 3种扩频码被破译的图像

从图 10 中可以看到,在图像传输过程中信息被截获,3种序列所恢复出来的图像都已经严重失真,而且很明显分段 Logistic 映射比前两种映射恢复出来的图像更加偏离真实图像。这就表明,这种分段 Logistic 映射比现有的改进型 Logistic 映射具有更好的安全性。

结束语 Logistic 映射是目前经常使用的一种混沌系统,具有较好的性能。在此基础上的改进型 Logistic 映射完善了均值和相关特性,使混沌序列能更好地应用于扩频通信中,但同时也存在一些不足。本文在改进型 Logistic 映射基础上提出一种新的分段 Logistic 映射,并与现有的改进型进行对比,其性能在很多方面都得到改进。将其用于扩频通信中也可以得到更优的结果。这些实验都表明,分段 Logistic 映射可以具有更加广泛的应用。

参 考 文 献

[1] 邱劲,王平,肖迪,等.基于混沌映射的伪随机序列发生器[J].
计算机科学,2011,38(10):81-83

[2] 廖施煊,高金峰.广义映射混沌扩频序列及其特性分析[J].
电子与信息学报,2006,28(7):1255-1257

[3] Mazzini G, Setti G, Rovatti R. Chaotic complex spreading sequences for asynchronous DS-CDMA Part2: Some theoretical performance bounds [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems Part1, 1998, 45(4): 496-506

[4] 杨吉云,廖晓峰,肖迪,等.对一种基于 Logistic 映射的分组加密

机制的分析和改进 [J]. 通信学报, 2008, 29(12): 86-90

[5] 郑世慧,张国艳,杨义先,等.基于混沌的带密钥散列函数安全分析 [J]. 通信学报, 2011, 32(5): 146-152

[6] Heidari-Bateni G, Mcgillern C D. A chaotic direct-sequence spread-spectrum communication system [J]. IEEE Transactions on Communications, 1994, 42(2-4): 1524-1527

[7] Mazzini G, Setti G, Rovatti R. Chaotic complex spreading sequences for asynchronous DS-CDMA Part1: System modeling and results [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems Part1, 1997, 44(10): 937-947

[8] Mazzini G, Setti G, Rovatti R. Chaotic complex spreading sequences for asynchronous DS-CDMA Part2: Some theoretical performance bounds [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems Part1, 1998, 45(4): 496-506

[9] Parlitz U, Ergezingler S. Robust communication based on chaotic spreading sequences [J]. Physics Letters, 1994, A188: 146-150

[10] 王亥,胡健栋.改进型 Logistic-Map 混沌扩频序列 [J]. 通信学报, 1997, 8(8): 71-77

[11] Sandoval-Morantes D, Munoz-Rodriguez D. Chaotic sequences for multiple access [J]. Electronics Letters, 1998, 34(3): 235-237

[12] 范九伦,张雪峰.分段 Logistic 映射及其性能分析 [J]. 电子学报, 2009, 4(4): 720-725

[13] 赖建文,周世平,李国辉,等.非正交的李雅普诺夫指数的计算方法 [J]. 物理学报, 2000, 49(12): 2328-2332

[14] 柳平,闫川,黄显高.改进的基于 Logistic 映射混沌扩频序列的产生方法 [J]. 通信学报, 2007, 28(2): 134-140

[15] 徐远明,邵玉斌. MATLAB 仿真在通信与电子工程中的应用 [M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2009

(上接第 32 页)

结束语 本文为异步休眠传感器网络设计了高效的 MAC 层广播协议。该协议能较好地应对广播报文的冲突,并且大幅降低广播能耗。为达到这两个目标,以随机变化的间隔多次重传广播数据,使得广播报文易于从冲突中区分,降低了广播报文的收发代价。我们在 NS-2 模拟环境中进行了深入的实验。结果验证,本协议在降低广播报文冲突、减小能耗方面有优越的性能。

参 考 文 献

[1] Demirkol I, Ersoy C, Alagoz F. MAC protocols for wireless sensor networks: a survey [J]. IEEE Communications Magazine, 2006, 44(4): 115-121

[2] MICAz notes [OL]. <http://www.memisic.com>

[3] Ye W, Heidemann J, Estrin D. Medium access control with coordinated adaptive sleeping for wireless sensor networks [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2004, 12(3): 493-506

[4] Ye W, Silva F, Heidemann J. Ultra-low duty cycle mac with scheduled channel polling [C] // Proceedings of the 4th International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. 2006: 321-334

[5] Polastre J, Hill J, Culler D. Versatile low power media access for wireless sensor networks [C] // Proceedings of the 2nd International

Conference on Embedded Networked Sensor Systems. 2004: 95-107

[6] Moon S, Kim T, Cha H. Enabling low power listening on IEEE 802. 15. 4-based sensor nodes [C] // Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference. 2007: 2305-2310

[7] Buettener M, Yee G, Anderson E, et al. X-MAC: a short preamble mac protocol for duty-cycled wireless sensor networks [C] // Proceedings of the 4th International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. 2006: 307-320

[8] Dutta P, Dawson-Haggerty S, Chen Y, et al. Design and evaluation of a versatile and efficient receiver-initiated link layer for low-power wireless [C] // Proceedings of the 8th International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. 2010: 1-14

[9] Römmer K. Time synchronization in ad hoc networks [C] // Proceedings of the 2nd ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing. 2001: 173-182

[10] Sundararama B, Buy U, Kshemkalyani A D. Clock synchronization for wireless sensor networks: a survey [J]. Elsevier Ad Hoc Network Journal, 2005, 3(3): 281-323

[11] 赵强利,蒋艳凤,徐明.无线传感器网络路由协议的分析与比较 [J]. 计算机科学, 2009, 36(2): 35-41

[12] McCanne S, Floyd S. ns Network Simulator [OL]. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>