



# 多包接收无线传感器网络的跨层优化策略研究\*

石 雷<sup>1</sup>, 韩江洪<sup>1</sup>, Yi Shi<sup>2</sup>, 魏振春<sup>1</sup>

(1.合肥工业大学计算机与信息学院 合肥 230009;

2.Dept.of ECE, Virginia Polytechnic Institute and State University Blacksburg, VA, USA 24061)

## 摘要

多包接收能有效提高无线传感器网络的网络吞吐量,但由于该思想在物理层实现的复杂性,决定了在上层难以建立充分发挥多包接收性能的最优传输方案。本文根据基于信噪比的物理层数据发送模型,通过研究可同时传输数据的节点集合,建立了链路层的分时传输模型。为了使该模型可在多项式时间内求解,提出了最大可行集合的概念,减少了求解的时间和空间复杂度,最终提出基于多包接收的无线传感器网络跨层优化策略。仿真显示,采用该策略后数据传输速率比传统方案提高了1倍。

**关键词** 无线传感器网络;多包接收;串行干扰抵消;线性规划;最大可行集合

## 1 引言

作为21世纪迅速崛起的通信手段,无线网络已经渗透到我们生活的方方面面,而具有低成本、低功耗、自组织、多功能等特点的无线传感器网络(wireless sensor network)有着更广泛的应用前景,如军事、农业、环境监测、医疗卫生、工业控制、交通管理等领域,因此引起了各国军事部门、工业界和学术机构的关注<sup>[1-4]</sup>。

在无线网络传输中,如何最大限度地利用传输信道一直是研究要点。在传统方式下,同一时刻如果有两个或者更多的节点向同一节点传送数据,就会发生冲突。此时必须将冲突数据包丢弃并重新发送,如ALOHA协议<sup>[5]</sup>,这会严重影响通信的效率和实时性。多包接收(multi-packet reception, MPR)<sup>[6-8]</sup>打破了这种束缚,使得一个节点可以同时接收多个节点的数据,并对其进行有效分离。在参考文献[7,8]中,作者提出使用完全干扰抵消算法(successive

interference cancellation, SIC)<sup>[9]</sup>、多用户检测(multi-user detection, MUD)<sup>[10]</sup>等技术实现多包接收。

采用多包接收后,接收端可以同时接收来自于多个节点的多份数据,提高了吞吐率。研究人员已经做了大量的工作,确认了多包接收对于无线网络性能的改善。如在参考文献[11]中,作者确定了在一个随机生成的网络里使用多包接收所取得的数据传输速率是 $\Theta((\lg n)^{(A-2)/2A})$ ,其中, $n$ 表示节点个数, $\lambda$ 表示信号传播时的衰减系数。而采用传统方案时这个数值是 $O((n \lg n)^{-1/2})$ 和 $\Omega(n^{-1/2})$ 之间<sup>[12]</sup>。这说明多包接收可以有效提高数据传输速率。遗憾的是,目前没有将其应用到某个无线网络中的具体方案。亦即对于一个给定的网络,参考文献[11]只是提供了一个可行方案,取得吞吐率的一个下界,而此下界与最优值之间可能存在很大的常数倍差距。因此,有必要针对这一问题进行探讨,提出如何应用多包接收提高数据吞吐率的最优方案。

基于信号处理的多包接收属于物理层的技术,但是节点发送集合会对数据链路层时间片分配产生影响,因此只有通过跨层设计才能得到最优方案。设计该最优方案的难

\* 国家自然科学基金资助项目(No.60873003, No.60873195)



点在于:一,目前几乎没有文献研究多包接收下的信噪比对于网络传输数据的影响和如何在此基础上建立网络模型;二,建立初步的优化模型后可以发现,模型中的变量过多、复杂度过高,无法在多项式时间内求解。

针对难点一,本文首先通过节点信噪比(signal to interference and noise ratio, SINR)与成功接收所需的最小信噪比的关系,推算出可以同时发送数据的可行节点集合需要满足的约束条件,在此基础上建立了问题的数学模型,该模型是线性规划模型;针对难点二,本文提出最大可行集合的概念,从而有效地减少了需要考虑的集合数目,最终使新的优化模型可以在多项式时间内求出最优解。

## 2 传统的无线传感器网络调度方案

首先,分析传统的(即不采用多包接收的)无线传感器网络调度方案。一个典型的无线传感器网络包含  $n$  个传感器节点  $s_i(i=1, \dots, n)$  和一个接入点 AP(access point)<sup>[13]</sup>。将传感器节点构成的集合记为  $N$ 。每个节点都使用功率  $P$  和带宽  $W$  将数据发送到 AP。为了避免冲突,可以使用时间片调度。调度用到的所有时间片组成的时间段记为  $T$ 。假设节点  $s_i(s_i \in N)$  的最小数据传输速率要求为  $r(i)$ 。目标是最大化因子  $K$ , 从而使得每一个节点都可以将  $Kr(i)$  的数据传输到 AP。

### 2.1 物理层模型

当节点  $s_i$  使用功率  $P$  发出数据时,接收端 AP 收到的信号功率为  $g_i P$ 。这里  $g_i$  表示节点  $s_i$  和 AP 之间的功率衰减。定义  $d_i$  表示节点  $s_i$  和 AP 之间的距离,  $\lambda$  为衰减指数, 则有:

$$g_i = a \cdot d_i^{-\lambda} \quad (1)$$

其中,  $a$  是和发射天线相关的一个常数。为了方便讨论, 可以将  $a$  归一化, 即  $a=1$ 。

当多个节点同时发送数据时, 节点  $s_i$  的信噪比为:

$$SINR_i = \frac{g_i P}{N_0 + \sum_{j \neq i} g_j P} \quad (2)$$

其中,  $N_0$  表示噪声功率, 对节点  $s_j(s_j \in N)$  的求和包括所有和节点  $s_i$  同时发送数据的其他节点。此时, 当且仅当  $SINR \geq \beta$  时, 其发出的数据才能被 AP 解码。对于阈值  $\beta$ , 在大多数编码和解码方案中都要求  $\beta > 1$ <sup>[16]</sup>。如果节点  $s_i$  数据发送成功, 取得的及时信道容量是  $W \log_2(1+SINR_i)$ 。

在传统方案中, AP 不可能同时成功接收多个节点的

信号。因为, 如果  $SINR_i \geq \beta > 1$ , 那么对于任一同时发送的其他节点  $s_j$ , 有  $g_j P > g_i P$ , 则必有  $SINR_j < 1 < \beta$ , 即  $s_j$  的发送不可能成功。因此, 需要采用多时间片的方式, 让这些节点分时间片发送数据。

### 2.2 多时间片传输方案

由于节点同时发送会产生冲突, 因此在数据链路层采用分时传送的方式, 即让各节点独占一个时间片。不妨根据节点个数将时间段  $T$  分成  $n$  个时间片, 每个节点  $s_i$  的传输占用一个时间片  $i$ 。时间片长度分别为  $t_1, t_2, \dots, t_n$ , 并且

$$\sum_{i=1, \dots, n} t_i = T。$$

当节点  $s_i$  发送数据时, 为了确保在时间片内来自于节点  $s_i$  的数据可以被 AP 解码, 即时数据传输速率应该小于等于  $W \log_2(1+SINR_i)$ , 其中:

$$SINR_i = \frac{g_i P}{T} \quad (3)$$

由此取得的数据传输速率  $c_i = \frac{t_i W}{D_T} \log_2(1+SINR_i)$ 。节点  $s_i$  的实际传输速率和信道容量关系是  $Kr(i) \leq c_i$ 。

由  $\sum_{i=1, \dots, n} t_i = T$ , 对  $t_i$  作归一化处理(即将  $t_i$  除以  $T$ )使得

$$\sum_{i=1, \dots, n} t_i = 1。归一化后信道容量为  $C_i = t_i W \log_2(1+SINR_i)$ , 问题目标是:$$

$$\text{Max } K$$

约束条件是:

$$\begin{cases} Kr(i) \leq t_i W \log_2(1+SINR_i), & (1 \leq i \leq n) \\ \sum_{i=1, \dots, n} t_i = 1 \end{cases} \quad (4)$$

其中,  $t_i$  和  $K$  为变量,  $W$  是常量,  $SINR_i$  的值由式(3)确定。这是一个线性规划问题, 其变量和约束的个数都为  $n+1$ , 时间复杂度为多项式的<sup>[15]</sup>。

## 3 基于多包接收技术的传感器网络优化方案

传统方案中的缺点是同一时刻只能有一个节点向 AP 传送数据, 因此限制了数据传输速率。采用了多包接收后, 多个节点可以在同一时刻向 AP 传送数据, 从而提高数据传输速率。

### 3.1 多包接收的成功传输条件

一种有效的实现多包接收思想的方案是通过 SIC 技

术<sup>[6]</sup>,它会根据接收到的节点信噪比  $SINR$  是否大于阈值  $\beta$  来判断数据是否可以解码。假设 AP 收到了一组信号,其中最强信号的信噪比大于  $\beta$ ,它会首先将最强信号解码并接收,然后将最强信号从原始信号中滤除掉,从而提高了次强信号的信噪比,接着判断次强信号的信噪比是否大于  $\beta$ ,如果大则次强信号可以被成功接收。以此类推,接收方可以继续解码第 3 强的信号,第 4 强的信号……直到某个信号无法解码,即其信噪比小于  $\beta$  为止。

下面分析采用 SIC 算法实现多包接收时的成功传输条件,考察节点集合  $N$  在时间段  $T$  上的调度。假设时间段  $T$  分为  $m$  个时间片,它们组成的集合记为  $M$ 。其中,时间片  $k(k \in M)$  归一化后的长度为  $t_k$ 。定义:

$$x_i^k = \begin{cases} 1 & \text{节点 } i \text{ 在时间片 } k \text{ 中向 AP 传输数据} \\ 0 & \text{其他情况} \end{cases}$$

注意,如果某节点传输数据不能成功,那么显然此传输不应该进行,所以不妨假设只有当数据能被成功接收时,节点  $s_i$  才向 AP 传输数据。

此时,同一个时间片内可能有多个节点的信息被 AP 接收,亦即对于同一个  $k$ ,可能有多个不同的  $i$  使得  $x_i^k=1$ 。分析某时间片内节点  $i$  发送时其他发送节点需要满足的条件,可以得到下面的定理。

定理 1: 若在时间片  $k$  内节点  $s_i$  向 AP 传输数据 ( $x_i^k=1$ ),则有:

(1) 如果  $\left[\beta\left(g_i + \frac{N_0}{P}\right)\right]^{-\frac{1}{\lambda}} \leq d_j \leq \left(\frac{g_i}{\beta} - \frac{N_0}{P}\right)^{-\frac{1}{\lambda}}$ , 则节点  $s_j$

不可以在时间片  $k$  内向 AP 传输数据 ( $x_j^k$  必为 0)。

(2) 其余节点可能在时间片  $k$  内向 AP 传输数据。

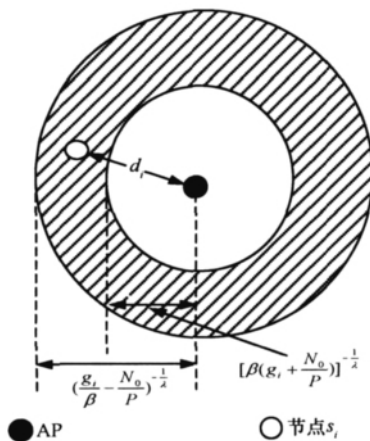


图 1 定理 1 描述的区域

(2-1) 如果  $d_j < \left[\beta\left(g_i + \frac{N_0}{P}\right)\right]^{-\frac{1}{\lambda}}$ , 则节点  $s_j$  可能向 AP 传输数据 ( $x_j^k$  可以为 1)。当  $x_j^k=1$  时,节点  $s_j$  的数据必须在  $s_i$  的数据解码之前解码。

(2-2) 如果  $d_j > \left(\frac{g_i}{\beta} - \frac{N_0}{P}\right)^{-\frac{1}{\lambda}}$ , 则节点  $s_j$  可能向 AP 传输数据 ( $x_j^k$  可以为 1)。当  $x_j^k=1$  时,节点  $s_j$  的数据必须在  $s_i$  的数据解码之后解码。

定理 1 提出了一个根据距离建立的发送节点集合约束区域。如图 1 所示,阴影部分区域(对应情况(1))属于发送禁忌区,圆环内外的区域节点可以向 AP 发送数据。其中,圆环内部(对应情况(2-1))节点发送的数据必须在  $s_i$  解码之前先解码,而圆环外部(对应情况(2-2))节点发送的数据则必须在  $s_i$  解码之后才能解码。

定理 1 是下面 4 个引理的总结。其中,定理 1 中的(1)对应引理 2 中的前半部分和引理 3,定理 1 中的(2-1)对应引理 4,定理 1 中的(2-2)对应引理 1 和引理 2 中的后半部分。

首先,分析比节点  $s_i$  到 AP 距离近的节点,有引理 1。

引理 1: 若在时间片  $k$  内节点  $s_i$  和节点  $s_j$  都向 AP 传输数据(即  $x_i^k=1, x_j^k=1$ ),如果有  $d_j \leq d_i$ ,则由节点  $s_j$  发出的数据必须被 AP 先解码后,才能再解码  $s_i$  发出的数据。

证明:由式(1)以及  $d_j \leq d_i$ ,不难得到  $g_j \geq g_i$ 。假定在时间片  $k$  内 AP 先解码节点  $s_i$  的数据再解码节点  $s_j$  的数据,于是在计算  $SINR_i^k$  时来自于节点  $s_j$  的数据就被看成是干扰中的一部分。则有  $SINR_i^k \leq \frac{g_i P}{N_0 + g_i P} < \frac{g_i P}{g_j P} \leq 1 < \beta$ 。因此,来自于节点  $s_i$  的数据不能被解码,矛盾,故假设不成立,证毕。

再分析比节点  $s_i$  到 AP 距离远的节点,有引理 2,其结果包含了定理 1 中的情况(2-2)。

引理 2:若在时间片  $k$  内节点  $s_i$  向 AP 传输数据(即  $x_i^k=1$ ),对于某个节点  $s_j$ , 如果有  $d_i \leq d_j \leq \left(\frac{g_i}{\beta} - \frac{N_0}{P}\right)^{-\frac{1}{\lambda}}$ , 则节点  $s_j$  在时间片  $k$  内不可以向 AP 传输数据(即  $x_j^k=0$ ); 如果  $d_j > \left(\frac{g_i}{\beta} - \frac{N_0}{P}\right)^{-\frac{1}{\lambda}}$ , 则节点  $s_j$  可能在时间片  $k$  内向 AP 传输数据 ( $x_j^k$  可以为 1),但  $s_j$  的数据必须在节点  $s_i$  的数据解码之后解码。

证明:假设节点  $s_j$  在时间片  $k$  内传输数据(即  $x_j^k=1$ ),而且  $d_i \leq d_j$ 。根据引理 1,节点  $s_i$  发出的数据必须被 AP 先解码,此时节点  $s_j$  的数据为干扰中的一部分,应



有  $\beta < SINR_i^k \leq \frac{g_i P}{N_0 + g_i P}$ 。上式化简可得  $d_j > \left(\frac{g_i}{\beta} - \frac{N_0}{P}\right)^{-\frac{1}{\lambda}}$ ，由此可以得到引理中的两种情况，证毕。

由引理 2 可进一步引申出引理 3。

引理 3：若在时间片  $k$  内节点  $s_i$  向 AP 传输数据 (即  $x_i^k=1$ )，对于某个节点  $s_j$ ，如果有  $\left[\beta\left(g_i + \frac{N_0}{P}\right)\right]^{-\frac{1}{\lambda}} \leq d_j \leq d_i$ ，则节点  $j$  在时间片  $k$  内不可以向 AP 传输数据 (即  $x_j^k=0$ )。

证明：假设节点  $s_j$  也在时间片  $k$  内向 AP 传输数据 (即  $x_j^k=1$ )。注意，由  $\left[\beta\left(g_i + \frac{N_0}{P}\right)\right]^{-\frac{1}{\lambda}} \leq d_j$  可以得到  $d_i \leq \left(\frac{g_i}{\beta} - \frac{N_0}{P}\right)^{-\frac{1}{\lambda}}$ 。根据引理 2，既然节点  $s_j$  在时间片  $k$  内向 AP 发送数据，而且  $d_j \leq d_i \leq \left(\frac{g_i}{\beta} - \frac{N_0}{P}\right)^{-\frac{1}{\lambda}}$ ，则  $s_i$  不能够在时间片  $k$  内实现数据传输 (即  $x_i^k=0$ )，矛盾，故假设不成立，证毕。

由引理 2 和 3，定义  $I_i$  表示满足  $\left[\beta\left(g_i + \frac{N_0}{P}\right)\right]^{-\frac{1}{\lambda}} \leq d_j \leq \left(\frac{g_i}{\beta} - \frac{N_0}{P}\right)^{-\frac{1}{\lambda}}$  的节点集合，则如果  $s_j \in I_i$ ，有  $x_j^k=0$ 。这就是定理 1 中的情况(1)。

由引理 3，引理 1 可进一步强化成引理 4，也就是定理 1 中的情况(2-1)。

引理 4：若在时间片  $k$  内节点  $s_i$  向 AP 传输数据 (即  $x_i^k=1$ )，对于某个节点  $s_j$ ，如果其在时间片  $k$  内传输数据 (即  $x_j^k=1$ )，并且有  $d_j < \left[\beta\left(g_i + \frac{N_0}{P}\right)\right]^{-\frac{1}{\lambda}}$ ，则从节点  $s_j$  发出的数据也可以被 AP 解码，且应该在节点  $s_i$  的数据解码之前解码。

### 3.2 多包接收的信道容量及优化策略

设在时间片  $k$  内节点  $s_i$  向 AP 成功发送了数据 (即  $x_i^k=1$ )，现在计算采用多包接收时的信噪比  $SINR_i^k$  以及信道容量。

对于满足定理 1 情况(1)的那些节点  $s_j$ ，即  $\left[\beta\left(g_i + \frac{N_0}{P}\right)\right]^{-\frac{1}{\lambda}} \leq d_j \leq \left(\frac{g_i}{\beta} - \frac{N_0}{P}\right)^{-\frac{1}{\lambda}}$ ，有  $x_j^k=0$ 。因此此时不存在来自于这些节点  $s_j$  的干扰。

对于满足定理 1 情况 (2-1) 的那些节点  $s_j$ ，即  $d_j < \left[\beta\left(g_i + \frac{N_0}{P}\right)\right]^{-\frac{1}{\lambda}}$ ，则要么  $x_j^k=0$ ，要么来自于节点  $s_j$  的数据已经被 AP 解码。此时，节点  $s_j$  在时间片  $k$  内要么没发送数据，要么发送的数据能在  $s_i$  之前顺利解码，即来自于

这些节点  $s_j$  的干扰要么不存在，要么已消除。

只有满足定理 1 情况 (2-2) 的那些节点  $s_j$ ，即  $d_j > \left(\frac{g_i}{\beta} - \frac{N_0}{P}\right)^{-\frac{1}{\lambda}}$ ，才会对  $s_i$  产生干扰。于是信噪比为：

$$SINR_i^k = \frac{g_i \times x_i^k P}{N_0 + \sum_{d_j > \left(\frac{g_i}{\beta} - \frac{N_0}{P}\right)^{-\frac{1}{\lambda}}} g_j \times x_j^k P} \quad (5)$$

同样，节点  $s_i$  在时间片  $k$  内的数据传输速率应该小于等于及时信道容量  $W \log_2(1 + SINR_i^k)$ 。根据各时间片的长度，节点  $s_i$  取得的总信道容量为  $c_i = \sum_{k \in M} t_k W \log_2(1 + SINR_i^k)$ 。注意，采用多包接收后的数据传输率  $c_i$  和 §2.2 中传统 (即不采用多包接收) 方案的数据传输速率  $c_i$  不同。前后两处计算公式的比较，也体现了采用多包接收对信道容量的影响。

由节点  $s_i$  的实际传输速率应小于等于在整个传输过程的数据传输速率，得：

$$Kr(i) \leq \sum_{k \in M} t_k W \log_2(1 + SINR_i^k) \quad (6)$$

此时问题目标是求：

$$\text{Max } K$$

约束条件是：

$$\begin{cases} Kr(i) \leq \sum_{k \in M} t_k W \log_2(1 + SINR_i^k), & (1 \leq i \leq n) \\ \sum_{k \in M} t_k = 1 \end{cases} \quad (7)$$

其中， $t_k$  和  $K$  为变量， $W$  是常量， $SINR_i^k$  的值由式(5)确定。这是一个线性规划问题，其变量的个数为  $m+1$ ，约束个数为  $n+1$ 。

但是，当采用多包接收时，为了求出最优解，需要足够多的时间片，使得每个可能的同时发送的节点集合 (称这样的集合为可行集合) 都能被安排发送。对于一个有  $n$  个节点的传感器网络，可行集合的数目最多为  $2^n - 1$ ，即时间片的数目  $m$  是  $\Theta(2^n)$ ，那么对应的变量  $t_k (k \in M)$  的个数也就是  $\Theta(2^n)$ 。因此解上面的线性规划问题，复杂度不是多项式时间的。

### 3.3 最大可行集合以及改进的优化策略

考虑两个可行集合  $A_1$  和  $A_2$ ，首先定义“集合  $A_1$  比集合  $A_2$  好”这一概念。

定义 1：集合  $A_1$  比集合  $A_2$  好的含义为： $A_2 \subset A_1$ ，对于任意点  $s_i (s_i \in A_1)$ ， $s_i$  在  $A_1$  方案下取得的及时信道容量大于

等于其在  $A_2$  方案下取得的及时信道容量。

显然,如果集合  $A_1$  比集合  $A_2$  好,那么将任一解中采用集合  $A_2$  的时间片换成采用集合  $A_1$  的,这一新解所取得的  $K$  将至少和原解的  $K$  一样大。因此不需要考虑集合  $A_2$ ,即在建立线性规划模型时可以省下其对应的变量,可以分析出下面的结论。其证明较易,故略去。

引理 5:如果两个可行集合  $A_1$  比  $A_2$  多一个元素,而且这个元素比  $A_2$  里面所有元素都靠近 AP,那么  $A_1$  比  $A_2$  好。更具体地说,多出的那个元素在  $A_1$  方案下及时信道容量大于 0,在  $A_2$  方案下及时信道容量为 0;其他元素在两方案下及时信道容量一样。

由引理 5,可进一步定义最大可行集合。

定义 2:设有一个可行集合  $A$ ,如果对于任一比  $A$  内所有点都离 AP 近的点  $s, A \cup \{s\}$  都不是可行集合,则称  $A$  为最大可行集合。

根据定义 2 和引理 5,对于任一非最大可行集合  $B$ ,总可以发现一个可行集合  $A, A$  比  $B$  好,因此建模时不需要考虑  $B$ ,即只需要考虑所有最大可行集合。因此,如果最大可行集合内元素的个数不超过一个常数  $l$ ,那么最大可行集合的数目不超过  $\sum_{k=1, \dots, l} C(n, k) = O(n^l)$ ,即  $n$  的一个多项式函数。

首先,分析一个最大可行集合内相邻两点距离的比值。假设  $A$  为一个最大可行集合,  $s_i, s_j$  为该集合中相邻两点,其到 AP 的距离分别为  $d_i, d_j$ ,且有  $d_i < d_j$ 。根据定理 1,应有:

$$\frac{d_j}{d_i} > \frac{\left(\frac{g_i - N_0}{\beta P}\right)^{-\frac{1}{\lambda}}}{d_i} > \frac{\left(\frac{d_i^{-\lambda}}{\beta}\right)^{-\frac{1}{\lambda}}}{d_i} = \beta^{\frac{1}{\lambda}}$$

假定集合  $A$  中的所有点从近到远按顺序为  $s_1, s_2, \dots, s_h$ ,其到 AP 的距离分别为  $d_1, d_2, \dots, d_h$ ,则应有:

$$d_h \leq \left(\frac{P}{\beta N_0}\right)^{\frac{1}{\lambda}} = \beta^{-\frac{1}{\lambda}} \left(\frac{P}{N_0}\right)^{\frac{1}{\lambda}}$$

$$d_{h-1} < \frac{d_h}{\beta^{\frac{1}{\lambda}}} \leq \frac{\left(\frac{P}{\beta N_0}\right)^{\frac{1}{\lambda}}}{\beta^{\frac{1}{\lambda}}} = \left(\frac{P}{\beta^2 N_0}\right)^{\frac{1}{\lambda}} = \beta^{-\frac{2}{\lambda}} \left(\frac{P}{N_0}\right)^{\frac{1}{\lambda}} \dots$$

$$d_1 < \beta^{-\frac{h}{\lambda}} \left(\frac{P}{N_0}\right)^{\frac{1}{\lambda}}$$

这是一个首项为  $d_1$ ,末项为  $d_h$ ,相邻两项比  $\frac{d_j}{d_i}$  至少为

$\beta^{\frac{1}{\lambda}}$  的类似等比数列的一个数列。这个数列的项数最多为

$$\left\lceil \log_{\beta^{\frac{1}{\lambda}}} \frac{d_h}{d_1} \right\rceil$$

对于给定的网络,有  $d_1 \geq d_{\min}$  和  $d_h \leq d_{\max}$ ,这里  $d_{\min}$  和  $d_{\max}$  分别是所有节点到 AP 的距离中的最近和最远距离,为常数。最大可行集合包含的元素数目不超过

$$\text{常数 } l = \left\lceil \log_{\beta^{\frac{1}{\lambda}}} \frac{d_{\max}}{d_{\min}} \right\rceil$$

则最大可行集合的个数不超过  $\sum_{k=1, \dots, l} C(n, k) = O(n^l)$ ,因此,基于最大可行集合的线性规划

解法复杂度是多项式时间的。要注意的是,上面的分析只是为了定性地表明算法复杂度是多项式的。为了方便分析,对于最大可行集合的数目做了放大估计。§4 会进行更准确的分析,研究实际情况下复杂度的次数。

### 4 优化结果

下面根据实际数据比较采用本文所建立的基于多包接收的优化策略和传统发送方案的性能。

参数设置如下:令阈值  $\beta=3^{11}$ ,衰减系数  $\lambda=4$ ,噪声干扰  $N_0=10^{-10}$  W,功率  $P=1$  W,频道带宽  $W=22$  MHz(采用 IEEE 802.11 的通信带宽)。每个节点到 AP 的距离以及每个节点的数据传输速率随机生成,其中数据传输速率在 100 kbit/s~1 Mbit/s 这个量级,距离为 10~250 m,节点数为 10~50,每种节点数目都随机生成 20 个不同的网络,最优策略的计算由 AP 实现。得到的结果取平均后见表 1,需要指出的是,对于不同的参数取值,以下计算结果会略有不同,但是不会影响该策略的改进率,即  $K$  值

表 1 K 值优化结果

节点数	传统方案下的 K 值	采用 MPR 技术下的 K 值	改进率
10	23.97	39.78	65.96%
15	15.79	25.11	59.02%
20	11.62	22.24	91.40%
25	9.31	17.75	90.66%
30	7.18	14.88	107.24%
35	6.21	13.75	121.42%
40	5.25	10.9	107.62%
45	4.96	9.83	98.19%
50	4.50	8.66	92.44%



表2 集合个数的比较

节点数	可行集合数上界	最大可行集合数上界	实际最大可行集合数
10	1 023	1 023	70.10
15	32 767	32 646	399.25
20	$1.04 \times 10^6$	$9.1 \times 10^5$	1 130.30
25	$3.35 \times 10^7$	$1.68 \times 10^7$	4 038.05
30	$1.07 \times 10^9$	$1.94 \times 10^8$	12 490.10
35	$3.44 \times 10^{10}$	$1.54 \times 10^9$	32 803.45
40	$1.10 \times 10^{12}$	$2.55 \times 10^9$	64 575.75
45	$3.52 \times 10^{13}$	$9.12 \times 10^9$	74 604.60
50	$1.13 \times 10^{15}$	$1.72 \times 10^{11}$	135 103.20

的优化结果不变。

首先给出  $K$  值的优化结果,见表 1。

从表 1 可看出,在采用多包接收技术后,最优解里共同尺度因子  $K$  的值有了明显的增加。尤其是当节点超过 20 个后,采用多包接收技术的  $K$  值比未采用多包接收技术的  $K$  值基本上都提高了 1 倍左右。

分析引入了最大可行集合概念后对模型的优化程度,见表 2。

在表 2 中,可行集合数上界是  $2^n - 1$ ,最大可行集合数

上界是  $\sum_{k=1, \dots, l} C(n, k)$ 。其中,  $l = \left\lfloor \log_{\frac{1}{\beta}} \frac{d_{\max}}{d_{\min}} \right\rfloor = 12, d_{\max} = 250, d_{\min} = 10$ 。这里有个特例。 $l$  显然应该小于节点数  $n$ , 因此对于  $n = 10$  的网络,  $l$  应该修正为 10。实际最大可行集合数是程序统计的随机生成的 20 个网络中最大可行集合的个数平均值。从表 2 可以看出,基于最大可行集合所做的改进是非常有效的(第 4 列数值远小于第 2 列)。另外,实际最大可行集合数也远远小于其上界  $\sum_{k=1, \dots, l} C(n, k)$ 。

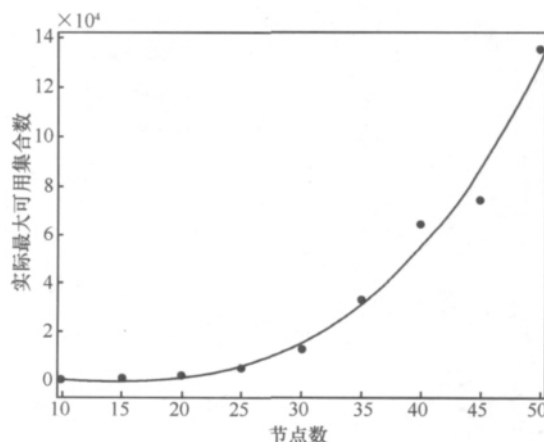


图2 节点数和实际最大可行集合数的拟合曲线

为了分析出准确的复杂度次数,对第 4 列的结果进行多项式拟合,得到的曲线如图 2 所示。

其拟合公式为:

$$y = 1.935x^3 - 48.26x^2 + 161.4x + 1496 \quad (8)$$

该拟合曲线为三次多项式,这也说明了最大可行集合的数量和节点数量之间的关系近似为  $\Theta(n^3)$ 。

## 5 结束语

本文根据基于信噪比的物理层数据发送模型,通过研究可同时传输数据的节点集合,建立了基于多包接收的链路层分时传输模型,并通过提出最大可行集合的概念,设计了多项式时间复杂度的优化策略。最后给出实验计算比较结果,说明在采用该策略后,网络性能得到明显提升。在实际运用中,可让该策略在接入点中实现。

本文所建立的优化策略建立在单接入点基础上,适合于无线传感器网络。多包接收并不仅仅用于传感器网络,对模型进一步进行改进和扩充,使其能够用于多跳多接入点,从而可应用于其他不同的无线网络,将是今后研究和设计工作的重点。

## 参考文献

- 1 Yi Shi, Thomas Y H. On the capacity of UWB-based wireless sensor network. Elsevier Computer Networks Journal, 2008, 52 (10): 2 797~2 804
- 2 Thomas Y H, Yi Shi, Hanif D S. Rate allocation and network lifetime problems for wireless sensor networks. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2008, 16(4): 321~334
- 3 Tao D, Ma H D, Liu Y H. Energy-efficient cooperative image processing in video sensor networks. In: Proc of the 2005 Pacific-Rim Conf on Multimedia, Berlin, 2005

- 4 Narayanan Sadagopan, Bhaskar Krishnamachari. Maximizing data extraction in energy-limited sensor networks. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2005, (1): 123~147
- 5 Chen D, Varshney P K. QoS support in wireless sensor networks: a survey. In: *Proceedings of the International Conference on Wireless Networks*, Bogart, USA, 2004
- 6 Tong L, Zhao Q. Multi-packet reception in random access wireless networks: from signal processing to optimal medium access control. *IEEE Communications Magazine*, 2001, 39 (11): 108~122
- 7 Ghez S, Verdu S, Schwartz S. Stability properties of slotted aloha with multi-packet reception capability. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1988, 33(7): 640~649
- 8 Ghez S, Verdu S, Schwartz S. Optimal decentralized control in the random access multi-packet channel. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1989, 34(11): 153~163
- 9 Toupnis S, Goldsmith A J. Capacity regions for wireless ad hoc networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2003, 2(4): 736~748
- 10 Verdu S. *Multiuser detection*. Cambridge University Press, 1998
- 11 Wang Z, Sadjadpour H R, Garcia-Luna-Aceves J J. The capacity and energy efficiency of wireless ad hoc networks with multi-packet reception. In: *Proc ACM Mobicom*, Hong Kong, SAR, China, May 2008
- 12 Gupta P, Kumar P R. The capacity of wireless networks. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2000, 46(2): 388~404
- 13 Shih E, Cho S H, Ickes N, *et al.* Physical layer driven protocol and algorithm design for energy-efficient wireless sensor networks. New York: ACM Press, 2001
- 14 Goldsmith A J, Chua S G. Adaptive coded modulation for fading channels. *IEEE Trans On Communications*, 1998, 46(5): 595~602
- 15 Bazaraa M S, Jarvis J J, Sherali H D. *Linear programming and network flows*, 2nd ed. New York: Wiley, 1990

【作者简介】 石雷,合肥工业大学计算机与信息学院博士生,主要研究方向为无线网络;韩江洪,合肥工业大学计算机与信息学院博士生导师,教授,主要研究方向为计算机控制、可靠性工程、无线网络;Yi Shi, Dept of ECE, Virginia Polytechnic Institute and State University, USA. His research focuses on algorithms and optimization for cognitive radio networks, MIMO and co-operative communication networks, MPR networks, sensor networks, and ad hoc networks;魏振春,合肥工业大学计算机与信息学院副教授,主要研究方向为计算机控制、无线传感器网络。

## Maximizing Throughput for Wireless Sensor Network With Multi-Packet Reception

Shi Lei<sup>1</sup>, Han Jianghong<sup>1</sup>, Yi Shi<sup>2</sup>, Wei Zhenchun<sup>1</sup>

(1. School of Computer & Information, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. Dept. of ECE, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA 24061, USA)

**Abstract** Multi-packet reception (MPR) technique is a promising approach to increase throughput for wireless networks. Due to its complex physical layer behavior, optimal solutions are yet to be determined. Based on the physical interference model, we analyze all constraints for concurrent transmissions under MPR and thus identify all feasible sets of concurrent transmissions. By scheduling these feasible sets into different time slots, the throughput maximization problem can be formulated as a linear program. However, the problem size is exponential due to the large number of feasible sets. We propose a concept of largest feasible set to decrease the problem size, which enables us to obtain a cross-layer optimal solution in polynomial-time. Comparing with optimal solutions without MPR, we show that throughput can be increased about 100% by using MPR in simulation.

**Key words** wireless sensor network, multi-packet reception, successive interference cancellation, linear program, largest feasible set

(收稿日期:2010-11-24)