

无线传感器网络中能量有效的波束成形机制

秦智超, 周正, 赵小川

(北京邮电大学 泛网无线通信教育部重点实验室, 北京 100876)

摘要: 针对无线传感器网络中单个节点能量和通信距离均受限, 以及传统波束成形机制中由于忽略能耗均衡而造成单个节点过早死亡的特点, 提出了一种能量有效的波束成形机制。首先分析了节点个数、发射系数、功率受限、相位等因素对网络能耗的影响, 给出了对应的设计原则。然后, 基于此原则来选择参与发射的节点, 并结合节点的剩余能量和相位来调整各自的发射系数。理论分析和仿真结果表明, 该机制有效地增加了数据成功传输的次数, 均衡了节点间的能耗, 延长了网络寿命。

关键词: 无线传感器网络; 波束成形; 能量均衡; 发射系数

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2013)04-0019-09

Energy efficient beamforming scheme for wireless sensor networks

QIN Zhi-chao, ZHOU Zheng, ZHAO Xiao-chuan

(Key Laboratory of Universal Wireless Communications, Ministry of Education,
Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: Aiming at the limitation of energy and communication distance for nodes in wireless sensor networks and the characteristics of premature death due to ignoring the energy balance for traditional beamforming schemes, an energy efficient beamforming scheme was proposed. First the impact of the number of nodes, the transmission coefficients, the limited power, and the arrival phase on the network energy consumption is analyzed, and the corresponding design principles are given. Then, the nodes which participate the beamforming are selected based on these principles their transmission coefficients are adjusted according to their residual energy and phase. The analysis and simulation results show that the proposed scheme can effectively increase the number of successful transmission, balance the energy consumption among the nodes and prolong the network life time.

Key words: wireless sensor networks; beamforming; energy balance; transmission coefficients

1 引言

无线传感器网络 (WSN, wireless sensor networks) 是由大量廉价的微型传感器节点组成的多跳自组织无线网络, 在环境监控、灾难救助、目标跟踪和战场态势感知等领域有着广泛的应用前景, 引起了许多研究人员的关注^[1]。传感器节点一般由电池供电且难以补充能量, 使得能量受限成为限制 WSN 大规模应用的首要问题, 所以在

各层的协议设计以及相关的支撑技术中均需要考虑能量因素。

节点除了能量受限以外, 由于其硬件资源的限制, 通信距离也往往有限, 仅仅依靠单个节点难以满足远距离通信的要求。多跳通信是解决远距离通信的方案之一, 但是不可避免地带来一定的时延, 这对于时延敏感的应用 (如战场态势感知) 来说是不可忍受的, 同时多次转发也会增加数据传送失败的概率, 降低传输的性能^[2]以及造成基站附近的热

收稿日期: 2012-03-31; 修回日期: 2012-09-10

基金项目: 国家科技重大专项基金资助项目 (2009ZX03006-009); 韩国知识经济部仁荷大学 ITRC 基金资助项目 (NIPA-2011-C1090-1111-0007)

Foundation Items: The National Science and Technology Major Project of the Ministry of Science and Technology of China (2009ZX03006-009); ITRC Support Program Supervised by the National IT Industry Promotion Agency of Korea (NIPA-2011-C1090-1111-0007)

点问题^[3]。另外，在面临没有中继节点可选的情况下，多跳通信将不再适用，如无人机在高空收集由布撒在地面上的节点采集的数据。

波束成形^[4,5]是解决该问题的一种很好的思路，它利用 WSN 节点数目众多以及相关性高的特点，将多个参与发射的节点组成一个虚拟的天线阵列，利用电磁波的相干叠加原理在指定的方向上增强信号的强度，以有效地延长节点的通信距离及降低对多跳的需求^[6]。与单个节点发送数据相比，波束成形可以将长距离传输所需的能耗均匀分担到多个参与发射的节点中，而每个节点只需消耗较少的能量，因此均衡了节点间的能耗。

无线传感器网络与天线阵这 2 个领域都已经有了大量的相关研究，而将无线传感器网络与天线阵的波束成形技术相结合则是一个近年来刚兴起的研究方向^[7]，并取得了多方面的成果。如文献[6,8]设计了 WSN 中适用于波束成形的收发信机结构；文献[9,10]提出了 WSN 中应用波束成形的路由和中继协议；文献[11,12]研究了 WSN 中在指定波束形状条件约束下的分布式算法；文献[13]研究了 WSN 中定位误差对波束成形性能的影响，并提出了一种适用于波束成形的节点定位算法。

发射节点的选择和调度是波束成形算法中的一项核心内容。文献[14]针对无人机的场景提出了一种具体的波束成形机制，但没有考虑节点能量、发射系数及相位等因素带来的影响；文献[13]提出的 DC-BMF 算法按照节点剩余能量的大小对节点进行选择，对发射系数和相位并没有涉及。文献[3]虽然考虑了节点的发射系数及剩余能量问题，同样没有考虑相位问题，另外节点个数的选择也没有涉及。PP 算法^[15]和 EP 算法^[16]是专为 WSN 中波束成形机制设计的调度算法，其中 PP 算法通过比较各节点发射信号到达目标节点的相位将节点分成若干组，每次传输使用其中的一组节点参与波束成形，在各组间实现了一定的能耗均衡；EP 算法综合考虑了节点的剩余能量及各节点发射信号到达目标节点的相位，并引入旋转度的概念，使能耗在各节点间进行了有效的均衡，但是这 2 种算法均假设各节点具有相同的发射系数以及没有考虑参与波束成形的最优节点个数。

针对以上问题，本文结合节点的实际通信能耗模型，综合考虑节点个数、发射系数、功率受限、相位对网络能耗的影响，提出了一种能量有

效的波束成形机制(EEBS)。与已有算法 (PP 算法、EP 算法) 相比，该机制有效地增加了数据成功传输的次数，均衡了节点间的能耗，延长了网络寿命。

2 系统模型及有效性分析

2.1 网络模型

与文献[16]相同，假设无线传感器网络中所有可能参与波束成形的节点随机分布在一个半径为 r 的圆形平面区域内，采用球面坐标系坐标 $(r_i, \theta_i = \frac{\pi}{2}, \varphi_i)$ 分别表示节点 i 的半径、天顶角，方位角。目标节点 (如无人机) 的坐标为 $(r_d, \theta_d, \varphi_d)$ ，如图 1 所示，其中被选中的节点加粗表示，并且具有如下特点。

- 1) 目标节点远离该圆形区域 (即 $r_d \gg r$)，单个节点由于功率受限无法将数据传输到目标节点，必须借助波束成形来进行数据传输。
- 2) 各节点知道目标节点的位置信息 (如无人机通过大功率广播其位置信息等) 并能够据此计算出自身所发信号到达目标节点的相位。
- 3) 各节点知道自己的剩余能量。
- 4) 各节点具有相同的最大发射功率，并能够进行调整。
- 5) 各节点均采用全向天线，且到目标节点间的信道不存在散射和反射。

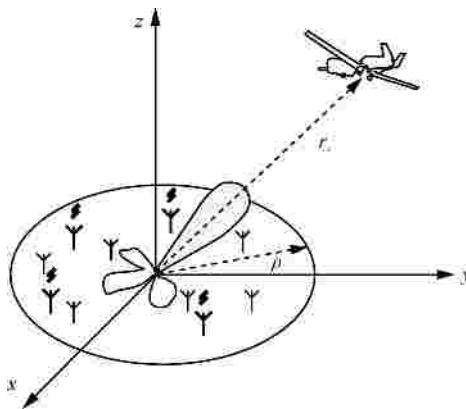


图 1 波束成形示意

2.2 能耗模型

无线通信能耗是 WSN 中主要的能耗部分，文献[17]给出了广泛采用的适用于无线传感器网络的能耗模型。由于假设到目标节点间的信道不存在散射和反射，所以在本文中仅采用其中的自由空间模

型。如果发送方与接收方的距离为 d ，则发送 k bit 数据消耗的能量可表示为

$$E_{Tx}(k, d) = kE_{elec} + kE_t = kE_{elec} + ke_{fs}d^2 \quad (1)$$

其中 E_{elec} 为发送 1 bit 数据中用于电路消耗的能量， E_t 为相应的用于发射消耗的能量， e_{fs} 为功率放大器消耗的能量比例系数。

接收方接收 k bit 数据消耗的能量为

$$E_{Rx}(k) = kE_{elec} \quad (2)$$

2.3 波束成形有效性

无线通信能耗由 2.1 节模型可以知道各节点到达目标节点的相位为

$$j'_i = j_i + \frac{2\pi}{\lambda} R_{i,d} \text{ mod } 2\pi \quad (3)$$

其中， j_i 表示节点的初始相位， λ 表示工作载波的波长， $R_{i,d}$ 表示节点 i 到目标节点的距离，不失一般性，考虑 $\lambda_d = \pi/2$ 的情况，其值为

$$R_{i,d} = \sqrt{r_d^2 + \lambda^2 - 2\lambda r_d \cos(f_d - f_i)} \quad (4)$$

相对于单个节点而言，在目标节点方向的系统增益为

$$G_a = \left| \sum_{i=1}^N a_i e^{j j'_i} \right|^2 \quad (5)$$

其中， N 表示选择的节点个数， a_i 表示节点的发射系数。考虑 100 个节点在 $a_i = 1$ 时， j'_i 在 $[0, j_{\max}]$ 间均匀分布时，系统增益随最大相位差 j_{\max} 变化时的性能（由 1 000 次仿真结果取平均），如图 2 所示。

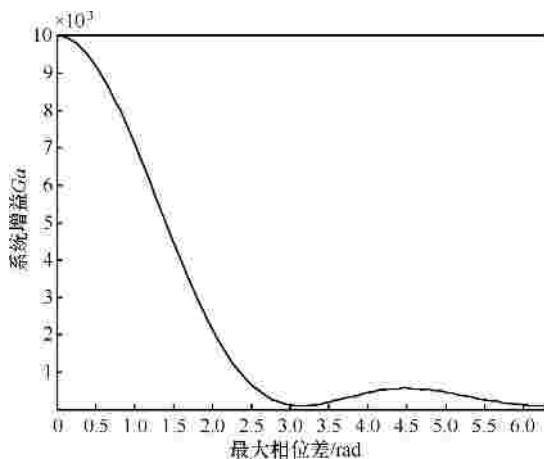


图 2 系统增益随最大相位差 j_{\max} 变化时的性能

由图 2 可见，当节点间的到达相位差较小时，在目标节点方向能够取得很高的系统增益，这将极大地扩展系统的通信距离，充分说明了在远距离通信时波束成形的有效性。

3 能耗分析

波束成形主要包括簇内广播的本地通信和联合发射的协作传输 2 个阶段^[18]。当一个源节点有数据要发送时，它首先在簇内进行广播，让其他的参与节点共享其数据，然后通过协作传输来形成具有较强方向性的波束。针对本地通信阶段，文献^[19]提出了一种用于数据共享的机制，结果表明当发射节点远离目标节点时用于数据共享的能量消耗可以忽略。所以在能耗分析中本文将忽略本地通信阶段所产生的能耗，只考虑在协作传输阶段所需的能耗，下面分析节点个数、发射系数、功率受限及相位对能耗的影响，为后面所提出的设计原则提供理论依据。

3.1 节点个数的影响

波束成形的效率取决于各发射机所发射的电磁波到达目标节点的相位差^[20]。如果各相位差为零，则效率为 100%，此时根据电磁波的叠加原理，如果有 N 个节点以相同的发射功率传输数据，则在目标节点处将会有 N^2 的增益，也就是说如果要传送相同的距离，利用波束成形则可以将每个节点的发射功率减少到原来的 $1/N^2$ 。由此可见， N 值越大，则各节点用于发射的能耗就越少，但是整个网络中用于电路消耗的能量将会上升。图 3 给出了在发射系数均为 1 且到达目标节点的相位均相同的条件下网络总能耗与发射节点个数的关系，其中通信参数 E_{elec} 、 e_{fs} 、 k 取自表 1。

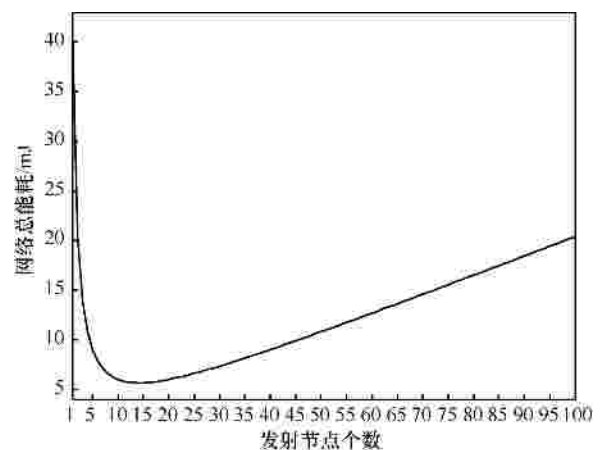


图 3 网络总能耗与发射节点个数的关系

表 1		仿真参数
符号	意义	值
N	节点的总数	100
E_{elec}	电路消耗参数	50 nJ/bit
k	数据分组长度	4 000bit
b	控制分组长度	20
e_{fs}	功率放大器消耗参数	10 pJ/bit/m ²
d_{max}	单个节点所能达到的最大传输距离	100m
r	区域半径	50m
r_d	目标节点距离该区域的距离	1 000m
E_{max}	节点的最大初始能量	0.1J

从图 3 可知存在一个最优值 N_{opt} ，使得网络的总能耗最小，下面对该值进行求解。

由于目标节点远离该圆形区域,可以近似认为各节点到目标节点的距离均为 r_d 。假设在不采用波束成形且暂不考虑节点功率受限的前提下,每个节点独立将 1bit 数据发送到目标节点所需的能耗中用于发射的部分为 $E_{t_need} = e_{fs} r_d^2$,可知当采用波束成形(效率为 100%)时,各个节点的实际发射能耗为 E_{t_need} / N^2 ,所以发送 k bit 数据消耗的总能量为

$$E_{beam} = (kE_{elec} + k \frac{E_{t_need}}{N^2})N = kE_{elec} N + k \frac{E_{t_need}}{N} \quad (6)$$

将其对 N 进行求导可得到 N 的最优值为

$$N_{opt} = \sqrt{\frac{E_{t_need}}{E_{elec}}} \quad (7)$$

代入表 1 中的参数得到其值为 14.14,与图 3 中所示的最优值 14 相吻合。值得注意的是以上最优值是在各节点具有相同的发射系数时得到的,此处将发射系数定义为节点的实际发射能耗与所需发射能耗比值的平方根,即

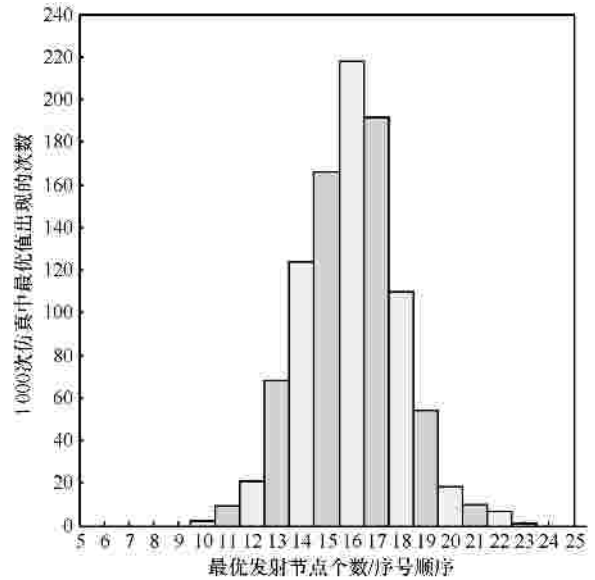
$$a = \sqrt{E_{t_real} / E_{t_need}} \quad (8)$$

下面通过蒙特卡罗仿真来研究当各节点发射系数不同时,对最优值的影响。赋予每个节点一个权值(该值的计算见 4.2 节),利用其占有参与波束成形节点的权值之和的比作为该节点的发射系数。假设各个节点的权值在 (0,1) 间均匀分布,当参与波束成形的节点数 N_{select} 选定后,各节点发射系数为

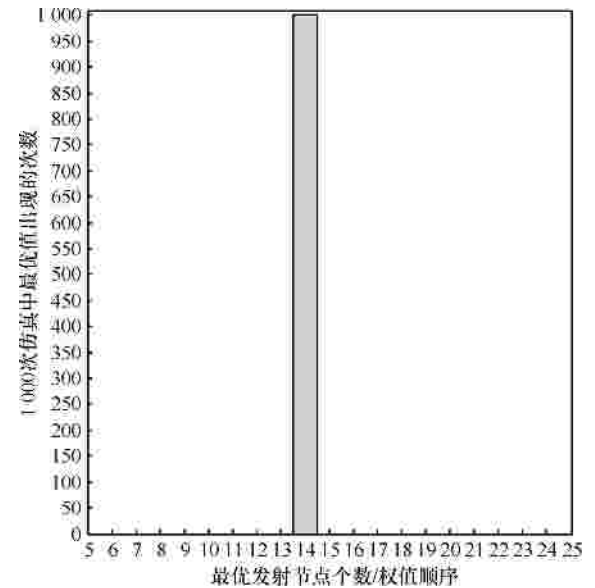
$$a_i = w_i / (w_1 + w_2 + \dots + w_{N_{select}}) \quad (9)$$

其中, i 表示节点的序号, w_i 表示节点 i 的权值。

分别按照节点的序号顺序和权值顺序(从大到小)选取参与波束成形的节点,统计 2 种选取方式在 1 000 次仿真中各最优值出现的次数,图 4 显示了 2 种方式对应的直方图。



(a) 序号顺序



(b) 权值顺序

图 4 发射系数不同时最优节点个数的分布直方图

从图 4 可知,发射系数的不同对节点个数最优值的选取存在一定的影响。当按照序号顺序选择节点时,由于所选节点间的发射系数相差较大,最优值的浮动范围较大。而按照权值顺序选取节点,所选节点间的发射系数相差较小,最优值基本维持在由式(7)所给出的定值上。

3.2 发射系数的影响

下面考虑当参与节点数 N_{select} 一定时，发射系数的选择对网络总能耗的影响。依然假设各节点的发射信号完全相干叠加，则恰好能将数据发送到目标节点时，各发射系数应该满足以下条件

$$a_1 + a_2 + L + a_{N_{\text{select}}} = 1 \quad (10)$$

此时网络的总能耗为

$$E_{\text{beam}} = kE_{\text{elec}} N_{\text{select}} + kE_{\text{t_need}} (a_1^2 + a_2^2 + L + a_{N_{\text{select}}}^2) \quad (11)$$

根据凸函数 $f = x^2$ 的性质，各数值平方的均值大于等于各数值均值的平方，有

$$\frac{a_1^2 + a_2^2 + L + a_{N_{\text{select}}}^2}{N_{\text{select}}} \left(\frac{a_1 + a_2 + L + a_{N_{\text{select}}}}{N_{\text{select}}} \right)^2 = \frac{1}{N_{\text{select}}^2}$$

等号当且仅当 $a_1 = a_2 = L = a_{N_{\text{select}}} = \frac{1}{N_{\text{select}}}$ 时成

立，所以当发射系数相等时总能耗将会获得最低值。采用蒙特卡罗仿真来研究各节点发射系数间的方差对网络总能耗的影响。图 5 显示了 $N_{\text{select}} = 14$ 时，各节点的发射系数遵循均值为 $1/14$ 的正态分布时，方差不同对能耗的影响(该图为 10 000 次仿真求平均的结果)。

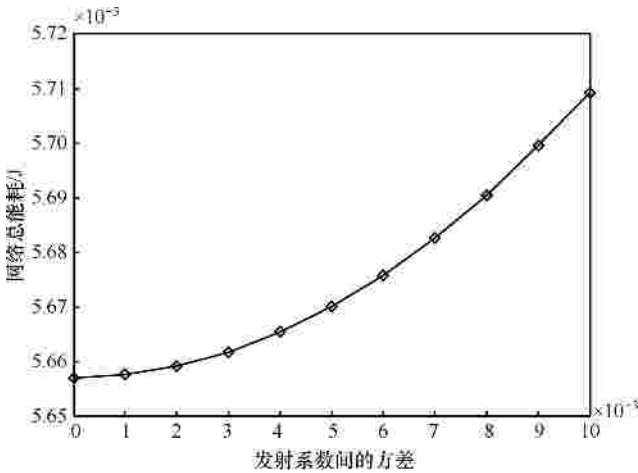


图 5 发射系数间方差对网络总能耗的影响

从图 5 中可以看出发射系数间的方差越小，网络的总能耗就越小。由于按照权值顺序选择参与波束成形的节点将会使得各节点发射系数间的方差较小，所以该方式除了对最优值的稳定性有贡献以外，同时也收到了降低总能耗的效果，这一特点为后面所提的波束成形机制中根据权值顺序选择节点提供了依据。

3.3 发射功率受限的影响

实际中的无线传感器节点往往功率有限，单个节点凭借自身的能力无法将数据发送到目标节点，这对于节点发射系数的选择提出了约束条件

$$a_i \leq a_{\text{up}} = \sqrt{E_{\text{t_max}} / E_{\text{t_need}}} = d_{\text{max}} / r_d \quad (12)$$

其中， a_{up} 表示节点的最大发射系数， $E_{\text{t_max}}$ 表示节点以最大功率发射 1bit 数据中用于发射消耗的能量， d_{max} 是与之对应的最大传输距离。另一方面也说明了如果要成功地进行数据传输，所需要的最小参与节点个数为

$$N_{\text{min}} = \left\lceil \sqrt{E_{\text{t_need}} / E_{\text{t_max}}} \right\rceil \quad (13)$$

3.4 相位差不为零的影响

节点间的相位差异会影响波束成形的效率，考查 2 个节点进行波束成形时的情况，引用文献[16]中的式(10)并将其进一步推导可以得到

$$P = |1 + \exp(j(\theta))|^2 = 4\cos^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (14)$$

其中， P 表示两者的合成功率， θ 表示两者的相位差。

由此可知波束成形的效率受两者相位差的影响，这一特点为后面的波束成形机制中利用相位差分配权值提供了依据。另外在考虑了相位差不为零的情况时，式(9)、式(10)、式(13)需要分别修正为

$$a_i = w_i / \left| w_1 e^{j\theta_1} + w_2 e^{j\theta_2} + L + w_{N_{\text{select}}} e^{j\theta_{N_{\text{select}}}} \right| \quad (15)$$

$$\left| a_1 e^{j\theta_1} + a_2 e^{j\theta_2} + L + a_{N_{\text{select}}} e^{j\theta_{N_{\text{select}}}} \right| = 1 \quad (16)$$

$$\left| e^{j\theta_1} + e^{j\theta_2} + L + e^{j\theta_{N_{\text{min}}}} \right| \sqrt{E_{\text{t_need}} / E_{\text{t_max}}} \quad (17)$$

式(17)中 N_{min} 是使不等式满足的最小整数，如果无解，则将其记为 ∞ 。

4 波束成形机制

4.1 设计原则

通过第 3 节的讨论可以总结出以下设计原则对于降低网络的总能耗是有利的。

- 1) 节点个数的选择要在满足最小参与节点个数要求的前提下尽量接近最优值。
- 2) 各节点的发射系数要在满足最大发射系数要求的前提下尽量相互接近。
- 3) 所选节点间的相位差要尽量小。

需要指出的是以上设计原则均是围绕着使网络的总能耗最小这一目标来进行的，并没有考虑到

节点间的能耗均衡。如果单个节点过早死亡，则有可能形成覆盖空洞，这样即使其他节点能量充足，整个网络的运行也会失去意义。所以本文所提的能量有效的波束成形机制的核心思想是根据节点的剩余能量和之间的相位差为选取节点分配不同的发射系数，并在此基础上结合以上 3 条原则来进行设计，以达到减少总能耗和均衡能量消耗的双重目的，具体步骤在下一节详细阐述。

4.2 机制描述

整个网络周期分为网络初始化和网络正常运行 2 个阶段。网络初始化阶段负责网络的建立、节点内置变量的初始化等任务。网络正常运行阶段则以轮的方式将各个节点感知的数据利用波束成形机制传输到目标节点。下面对这 2 个阶段分别进行阐述。

网络初始化阶段需要完成的具体任务如下。

- 1) 各节点通过定位算法^[13]和节点同步算法^[21]完成节点间的定位和同步工作。
- 2) 各节点通过信息交互，记录其通信距离范围内其他节点的位置信息。
- 3) 为所有节点内置一个 capable 标志，以表明每个节点是否有资格成为主节点（主节点指每轮中的临时控制节点），0/1 分别表示无资格/有资格，初始状态置为 1。

网络正常运行阶段将数据传输分为多轮进行，每轮中采取的具体步骤如下。

- 1) 在每轮数据传输的开始，所有 capable 标志为 1 的节点选择不同的延迟时间来广播 ADV 消息（消息中包含节点的到达相位 j_h ），宣布自己成为主节点，延迟时间与剩余能量成反比，一旦某节点竞争成功，则其他节点取消广播。
- 2) 所有节点接收到 ADV 消息后，根据其剩余能量及与主节点的相位差（称其为主相位差）来计算其权值，即 $w_i = E_{res} \cos(j_i - j_h)$ ，其中 $w_i > 0$ 的节点将其权值传输给主节点，作为参与波束成形的候选节点。
- 3) 主节点依据权值从大到小对候选节点进行排序，从 $N_{select} = \max(N_{min}, N_{opt})$ 处开始依次添加波束成形的节点，其中 N_{min} 和 N_{opt} 均由式(7)决定。如果 N_{select} 为无穷，则说明由其担当主节点通过任何方式均无法将数据成功地传输到目标节点，此时则将其 capable 标志置为 0，并转至步骤 1)重新选择参与节点。

4) 主节点根据节点的权值为所选取的节点根据式(15)计算发射系数，并检验排序后第一个节点的发射系数，通过式(12)检验其是否满足最大发射系数的要求。由于该节点的权值最大，其发射系数相应也最大，所以如果其满足要求，则后面所有的选取节点必然满足要求，不需要再次进行检验。反过来，如果其不满足要求，则需要对各个节点的发射系数依次进行调整。调整过程如下。

将第一个节点的发射系数调整至 a_{up} 并将其放入已调整节点集合，然后将其余选中节点的发射系数调整为原来的 l 倍，使其满足

$$\left| a_{up} e^{j\theta_1} + la_2 e^{j\theta_2} + \dots + la_{N_{select}} e^{j\theta_{N_{select}}} \right| = 1 \quad (18)$$

检验第二个节点是否满足最大发射系数的要求，如果满足，则调整完毕。否则对未进入已调整节点集合的节点按照相同的方式逐个进行调整，直到某一节点满足最大发射系数的要求时为止。这一调整过程由式(17)保证其肯定可以满足，因为发射系数集合 $(a_{min}, \dots, a_{N_{select}}, \dots, 0)$ 是式(17)的

一个特解。

经过调整后，主节点将最终的发射系数广播给需要参与的节点。

5) 本轮中需要传输数据的节点将其感知数据广播给选中的节点，然后各节点按照调整后的发射系数参与波束成形以进行数据传输，完成后经步骤 1)开始新一轮数据传输过程。

4.3 性能分析

网络初始化阶段仅在网络初期运行，在整个网络生命周期内占据比例很小，产生的能耗相对而言可以忽略。网络正常运行阶段的能耗基本上可以分为用于控制信息的能耗、用于数据共享的能耗及利用波束成形机制进行远距离通信所需的能耗 3 部分，其中用于数据共享的能耗在长距离通信时可以忽略^[19]。本节首先分析控制开销的能耗情况，然后将整体性能与传统的单节点直接传输进行对比，以验证其有效性。

不失一般性，假设控制消息的比特数统一为 $(b(b = k))$ bit。在本地通信中由于距离较近，遵循自由空间模型^[17]，如果各节点以最大功率进行发射，则每轮中竞争主节点产生的能耗为

$$E_{over,1} = E_{Tx}(b, d_{max}) + N_{cap} E_{Rx}(b)$$

节点将自身权值传输给主节点所产生的能耗为

$$E_{over_2} = N_{can} (E_{Tx}(b, d_{max}) + E_{Rx}(b))$$

主节点广播发射系数所产生的能耗为

$$E_{over_3} = E_{Tx}(b, d_{max}) + N_{select} E_{Rx}(b)$$

所以，总的控制信息能耗为

$$\begin{aligned} E_{over} &= E_{over_1} + E_{over_2} + E_{over_3} \\ &= (N_{select} + N_{cap} + 2N_{can} + 2) b E_{elec} + (N_{cap} + 2) b e_{fs} d_{max}^2 \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{E_{over}}{E_{over} + E_{beam}} \\ &= \frac{(4N + 2) b E_{elec} + (N + 2) b e_{fs} d_{max}^2}{(4N + 2) b E_{elec} + (N + 2) b e_{fs} d_{max}^2 + k E_{elec} N_{select} + k E_{t_need} (a_1^2 + a_2^2 + L + a_{N_{select}}^2)} \\ &= \frac{(4N + 2) b E_{elec} + (N + 2) b e_{fs} d_{max}^2}{(4N + 2) b E_{elec} + (N + 2) b e_{fs} d_{max}^2 + k E_{elec} N_{select} + k e_{fs} r_d^2 / N_{select}} \end{aligned}$$

图 6 给出了该上限值在 $b=20\text{bit}$, $k=4000\text{bit}$, $d_{max}=100$ 时随传输距离 r_d 变化的情况。

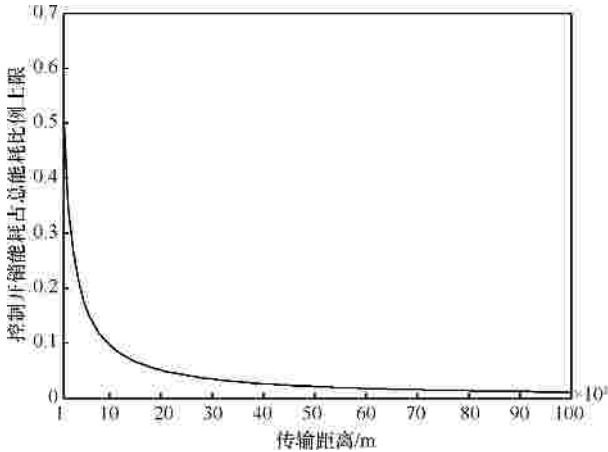


图 6 控制开销能耗占总能耗的上限

由图 6 可知，当目标节点距离区域非常远时，控制开销在总能耗中的比例很小，几乎可以忽略。而当距离较近时，控制开销所占的比例很大，利用波束成形则不再适合。

下面以单个节点直接将数据传输到基站所需的能耗 E_{direct} 为参照，研究本机制的节能增益，以两者能耗的比例 $\rho = E_{direct} / (E_{over} + E_{beam})$ 为指标，图 7 给出了其随传输距离 r_d 变化的情况（参数同图 6）。

由图 7 可见，节能增益呈现出一种近似线性的关系，相对于单个节点直接传输而言，距离目标节

其中， N_{cap} 表示网络中 capable 标志为 1 的节点总数， N_{can} 表示参与波束成形的候选节点个数， N_{select} 表示最终参与波束成形的节点个数。由于 N_{cap} 、 N_{can} 、 N_{select} 在网络运行过程中不断变化，则用于控制信息的能耗在总能耗中所占的比例 ρ 不为恒定值，但是存在上限，具体推导过程如下：

因为 $N_{can} \leq N, N_{can} \leq N, N_{select} \leq N$ ，则有

$$E_{over} \leq (4N + 2) b E_{elec} + (N + 2) b e_{fs} d_{max}^2$$

又因为 $a_1^2 + a_2^2 + L + a_{N_{select}}^2 \leq \frac{1}{N_{select}}$ ，所以

点越远时，产生的节能效果越明显。而当距离较近时，利用波束成形甚至会浪费能量，波束成形机制不再适用，这一点与图 6 结论相吻合。

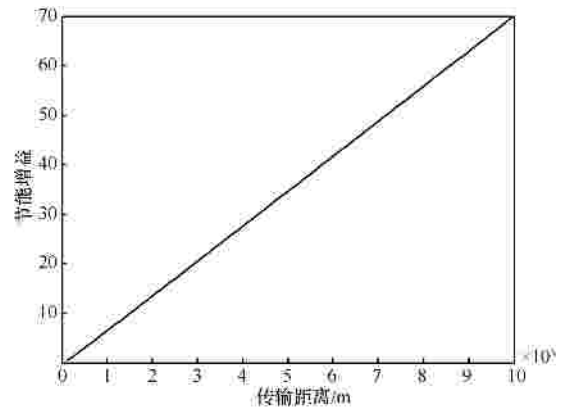


图 7 EEBS 的节能增益

5 仿真实验

下面利用 MATLAB 通过系统级仿真实验与已有的算法(PP 算法、EP 算法)进行对比，网络寿命定义为第一个节点死亡时的轮数。仿真场景为 100 个节点，假设其能量服从 $(0, E_{max})$ 间的均匀分布，到达相位服从 $(0, 2\pi)$ 间的均匀分布，所采用的仿真参数如表 1 所示。

图 8 显示了在该场景下数据成功传输的轮数及网络寿命与参与节点个数间的关系。

由图 8 可知，最优节点数在 14 附近，进一步验证了由式(7)给出最优值的合理性。另外在最优值附近成功发送数据的轮数与网络寿命非常接近，同时也说明了网络消耗的均衡性。而当参与发射的节点数过多时，受电路能耗线性上升和节点间相位差逐渐加大两方面因素的影响，能量消耗的均衡性迅速削弱，两者的差距逐渐拉大。

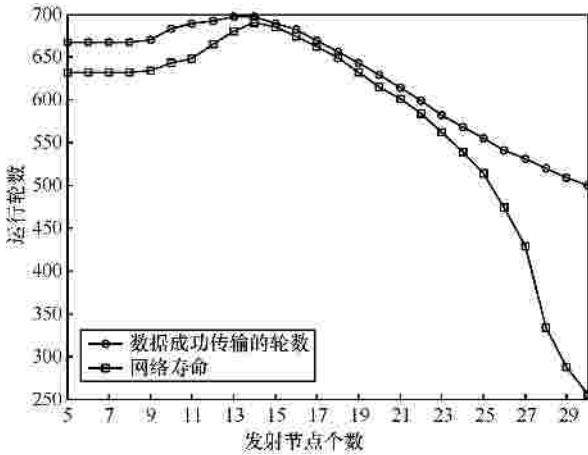


图 8 数据成功传输的轮数及网络寿命

图 9 给出了 EP 算法、PP 算法及本机制 (EEBS) 在数据成功传输的轮数和网络寿命方面的对比。

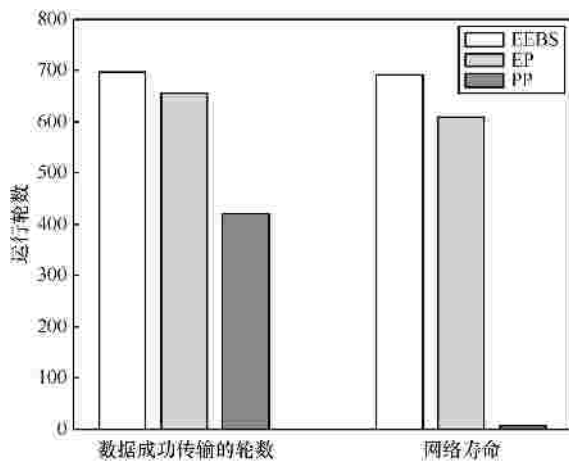


图 9 EP、PP 及本机制 (EEBS) 的性能比较

由图 9 可知，在数据成功传输的轮数方面 EEBS 为 697 轮 相对于 EP 算法的 656 轮和 PP 算法的 420 轮分别提高了 6%和 66%。在网络寿命方面，EEBS 为 690 轮，相对于 EP 算法的 609 轮和 PP 算法的 6 轮，分别提高了 13%和 115 倍。这是因为本机制综合考虑了节点个数的影响以及利用节点的剩余能量和主相位差来调整各节点的发射系数，并通过调整主节点来均衡节点间的能量消耗。而 EP 算法仅仅是

利用节点的到达相位和能量来选择节点，并没有考虑节点个数和发射系数的影响。PP 算法是通过相位对节点进行分组，完全不考虑节点剩余能量的影响，所以其网络寿命很短，能量消耗极为不均衡。

下面利用网络寿命时刻各节点剩余能量的方差^[13]及剩余能量的总和^[3]作为标准来衡量本机制能耗均衡的效果 (由 1 000 次仿真结果取平均)，如表 2 所示。

算法	剩余能量间方差	剩余能量的总和/J
PP	7.41×10^{-4}	4.35
EP	2.41×10^{-6}	0.30
EEBS	5.49×10^{-8}	0.04

由表 2 可知，在能量均衡方面，EEBS 性能要好于 EP 和 PP。PP 算法由于没有考虑剩余能量的影响，在到达网络寿命时刻网络中依然存在大量的剩余能量，浪费比较严重。EP 算法考虑了剩余能量及到达相位的因素，能量均衡特性相对于 PP 有了很大提高。而本机制相对于前两者而言，各节点间的能耗更加均衡，节能效果更显著。

6 结束语

本文提出了一种能量有效的波束成形机制，该机制根据剩余能量和主相位差来为各节点分配不同的权值，使每个参与节点根据其权值来调整其发射系数。同时在选择参与节点的过程中还综合考虑了节点个数和功率受限因素对网络能耗的影响。另外，在均衡网络消耗方面，与 EP 采用旋转度机制不同，本机制则通过调整主节点来达到这一目的。仿真结果表明，本机制有效地均衡了节点间的能耗，延长了网络寿命，特别适合于单跳之间距离过远的应用场合。需要指出的是到达相位 j'_i 的不确定性因素在本机制中并没有考虑，而初始相位 j_i 受时钟漂移和温度变化等因素的影响具有一定的不确定性，以及定位和同步的不准确性也会使距离计算存在一定的误差，所以 j'_i 将会难以准确的判定，这将给本机制的运行带来一定的挑战。同时信道状况的不同也会对性能产生很大影响，对这些因素的影响将在进一步的工作中进行研究。

参考文献：

[1] AKYILDIZ I F, SU W, SANKARASUBRAMANIAM Y, et al. A survey on sensor networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2002,

- 40(8): 102-114.
- [2] TOKUNAGA S, KAWAKAMI Y, HASHIMOTO K, *et al.* Power saving effect of sensor collaborative beamforming for wireless ubiquitous network systems[A]. The 14th Asia-Pacific Conference on Communications(APCC)[C]. Tokyo, Japan, 2008. 1-5.
- [3] AHMED M F A, VOROBYOV S A. Power control for collaborative beamforming in wireless sensor networks[A]. 2011 Conference Record of the Forty Fifth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers[C]. California, USA, 2011. 99-103.
- [4] VAN V B D, BUCKLEY K M. Beamforming: a versatile approach to spatial filtering[J]. IEEE ASSP Magazine, 1988, 5(2):4-24.
- [5] OCHIAI H, MITRAN P, POOR H V, *et al.* Collaborative beamforming for distributed wireless ad hoc sensor networks[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2005, 53(11):4110-4124.
- [6] ATHANASIOS G, KANATAS, ANTONIS K, *et al.* A single hop architecture exploiting cooperative beamforming for wireless sensor networks[J]. Physical Communication, 2011, 4(3): 237-243.
- [7] 尤览, 刘发林. 无线传感器网络波束合成的影响因素研究[J]. 中国科技大学学报, 2010, 40(4): 406-411.
YOU L, LIU F L. A study of the influencing factors of wireless sensor network beamforming[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2010, 40(4): 406-411.
- [8] SAYILIR S, LU Y, PEROULIS D, *et al.* Collaborative beamforming in wireless sensor networks[A]. 2011 Conference Record of the Forty Fifth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers[C]. California, USA, 2011. 1211-1215.
- [9] HAN Z, POOR H V. Lifetime improvement of wireless sensor networks by collaborative BEamforming and cooperative transmission[A]. IEEE International Conference on Communications (ICC'07)[C]. Glasgow, UK, 2007. 3954-3958.
- [10] ABDALLAH M M, PAPADOPOULOS H C. Beamforming algorithms for information relaying in wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2008, 56(10):4772-4784.
- [11] ZARIFI K, AFFES S, GHRAYEB A. Distributed processing techniques for beamforming in wireless sensor networks[A]. The 3rd International Conference on Signals, Circuits and Systems (SCS)[C]. Medenine, Tunisia, 2009. 1-5.
- [12] PAPALEXIDIS N, WALKER T O, TUMMALA M. An energy-efficient and distributed approach to beamforming in a wireless sensor network[A]. The 42nd Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers[C]. California, USA, 2008. 878-881.
- [13] URSO M F, ARNON S, MONDIN M, *et al.* A distributed and collaborative beamforming algorithm for a self-organizing wireless sensor network[J]. Physical Communication, 2011, 4(3): 172-181.
- [14] VINCENT P J, TUMMALA M, MCEACHEN J. A beamforming approach for distributed wireless sensor networks[A]. IEEE International Conference on System of Systems Engineering (SoSE'07)[C]. San Antonio, USA, 2007. 1-6.
- [15] CHANG C, KOTHARI A, JAFRI A, *et al.* Radiating sensor selection for distributed beamforming in wireless sensor networks[A]. IEEE Military Communications Conference (MILCOM'08)[C]. San Diego, USA, 2008. 1-7.
- [16] FENG J, CHANG C, SERKAN S, *et al.* Energy-efficient transmission for beamforming in wireless sensor networks[A]. The 7th Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor Mesh and Ad Hoc Communications and Networks(SECON)[C]. Boston, USA, 2010. 1-9.
- [17] HEINZELMAN W R, CHANDRAKASAN A, BALAKRISHNAN H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks [A]. Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences[C]. Hawaii, USA, 2000. 3005-3014.
- [18] 范建存, 殷勤业, 王文杰等. 无线传感器网络中协作波束形成的能量有效性分析[J].通信学报, 2008, 29(11):145-151.
FAN J C, YIN Q Y, WANG W J, *et al.* Analysis of energy efficiency for cooperative beamforming in wireless sensor networks[J]. Journal on Communications, 2008, 29(11): 145-151.
- [19] FENG J, NIMMAGADDA Y, LU Y, *et al.* Analysis of energy consumption on data sharing in beamforming for wireless sensor networks[A]. Proceedings of 19th International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN)[C]. Zurich, Switzerland, 2010. 1-6.
- [20] FENG J, LU Y, JUNG B, *et al.* Energy efficient collaborative beamforming in wireless sensor networks[A]. IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS'09)[C]. Taipei, China, 2009. 2161-2164.
- [21] GANERIWAL S, KUMAR R, SRIVASTAVA M B. Timing synchronization protocol for sensor networks[A]. Proceedings of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems[C]. Los Angeles, USA, 2003. 138-149.

作者简介：



秦智超（1981-），男，河北沧州人，北京邮电大学博士生，主要研究方向为无线传感器网络、认知无线电、无线和移动通信理论与技术等。



周正（1945-），男，上海人，北京邮电大学教授、博士生导师，主要研究方向为短距离通信、无线和移动通信理论与技术等。



赵小川（1984-），男，宁夏银川人，北京邮电大学博士生，主要研究方向为无线传感器网络、无线和移动通信理论与技术等。