

# 无线传感器网络波束合成的影响因素研究

尤 览, 刘发林

(中国科学技术大学电子工程与信息科学系, 安徽合肥 230027)

**摘要:**将无线传感器网络 WSN(wireless sensor networks)与天线阵波束合成技术相结合,可用以实现 WSN 的远距离无线通信.与以往节点选用各向同性天线时的情况不同,本文中节点选用定向天线.针对由此引入的天线轴角度偏移问题,具体分析了 WSN 中常见的节点失效和位置误差对合成波束方向图所带来的影响;通过对节点的辐射功率调整,在保持合成方向图主瓣特性的基础上,有效地降低了旁瓣电平;为增大网络的覆盖面积,可以在一定范围内对节点间距进行扩展,经研究发现,节点间距的扩展范围与所选用天线的波瓣特性有相对固定的约束关系.

**关键词:**定向天线;波束合成;天线轴偏移;节点失效;位置误差;辐射功率调整;节点间距扩展  
**中图分类号:**TN92      **文献标识码:**A      **doi:**10.3969/j.issn.0253-2778.2010.04.013

## A study of the influencing factors of wireless sensor network beamforming

YOU Lan, LIU Falin

(Department of Electronic Engineering and Information Science, USTC, Hefei 230027, China)

**Abstract:** Wireless sensor networks (WSN) technology was combined with antenna array beamforming to realize WSN's long range communication. Instead of using isotropic antennas as reported in the literatures, all nodes in this paper were equipped with directional antennas for beamforming. The influence of sensor node failure and position error on the combined beam pattern was analyzed considering the antenna beam inclination. The node's radiation power adjustment was studied to reduce the side lobe level effectively as the main lobe remained almost unchanged. To increase the networks' coverage area, node distance can be extended within a certain range which is constrained by the antenna beam pattern.

**Key words:** directional antenna; beamforming; antenna beam inclination; node failure; position error; radiation power adjustment; node distance extension

## 0 引言

无线传感器网络是一种全新的信息获取和处理技术.它通过各个传感器节点之间的相互协作,监测、感知和采集传感器网络所在区域的环境或目标信息,并采用无线传输的方式将数据发送回终端做进一步处理<sup>[1]</sup>.无线传感器网络可以被应用于许多

危险或偏远区域的数据采集工作中,由传感器节点自组织起一个 ad-hoc 网络,并将收集到的数据传出去.

由于无线传感器网络的节点在体积和能量方面受到诸多限制,使得仅仅依靠单个节点难以实现远距离通信,需要通过多个节点之间的相互协作来完成<sup>[2]</sup>.本文利用天线阵技术,通过多个节点之间的合

收稿日期:2008-04-29;修回日期:2008-06-20

作者简介:尤览,男,1983年生,硕士生.研究方向:WSN波束合成. E-mail:youlan@mail.ustc.edu.cn

通讯作者:刘发林,教授. E-mail:liufli@ustc.edu.cn

作,共同在特定方向上合成一个较尖锐的波束,以达到远距离传输数据的目的.

无线传感器网络与天线阵这两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合成技术相结合则是一个近年来刚兴起的研究方向.目前,此类研究的相关文献中普遍假设传感器节点选用的是理想的各向同性天线<sup>[3-5]</sup>.随着节点功能的增强,更多的实际应用中需要考虑到定向天线,本文针对选用定向天线的传感器节点进行了研究分析,获得了一些有益的结论.

首先在节点间距为半波长的基础上,综合考虑节点布撒过程中出现的天线轴角度偏移、WSN中常见的节点失效和位置误差等因素,仿真分析这些因素对合成波束方向图的影响;接着通过对各个节点的辐射功率进行适当调整,在保持原有主瓣特性的基础上,同时可以有效地降低旁瓣电平;最后,为增大传感器网络的覆盖面积,可以在一定范围内对节点间距进行扩展,但是这种扩展受到一定限制,其范围与所选用天线的波瓣特性有相对固定的约束关系.

## 1 系统描述

系统场景设定如图1所示.

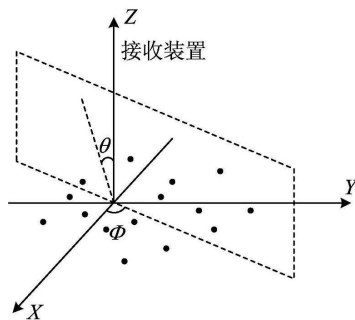


图1 仿真场景

Fig.1 Simulation scenario

传感器节点在完成布设之后,自组织起多个节点群,每个群中选出某些特定节点作为头节点综合管理群内节点.在做远距通信时,某个特定的节点群可能被挑选出来,它以天线阵的形式,通过波束合成技术将数据传送给远端的接收装置.

其中,假设接收装置处于传感阵列上方的 $\phi = \phi_0$ 方向,而在一定的 $\theta$ 范围内时与传感器网络进行通信.不妨假设在 $\theta \in (-20^\circ, 20^\circ)$ 内尝试接收来自传感器节点阵列的数据.当然,此角度范围也可以做适

当增减,以满足不同通信系统的要求.

出于简化分析的目的,同时又不失一般性,本文做了以下假设:

①为方便分析,传感器节点选用了简单的定向天线模型,其方向图函数为 $f(\phi, \theta) = |\cos \theta \cos 2\theta|$ ,半功率波瓣宽度 $\text{HPBW} = \pm 20.5^\circ$ <sup>[6]</sup>;

②在进行波束合成之前,各个节点之间已经很好地完成了频率、相位和时间同步工作,管理节点也已收集到各个子节点的位置信息和天线轴偏移角度信息;

③信号的反射和散射并不在本文的考虑范围之内,同时节点之间的耦合影响也将忽略.

## 2 影响因素分析

### 2.1 节点天线轴偏移影响

与以往节点选用各向同性天线时的情况不同,由于本文选用的是定向天线,而且各个节点的天线轴偏移角度不同,所以不能简单地采用通常天线阵分析中的图乘法,合成波束应该是各个天线的叠加结果.具体远区场的合成波束方向函数可以表示为

$$F(\phi, \theta) = \sum_{k=1}^N A_k f_k(\phi, \theta) |_{\Delta\phi_k, \Delta\theta_k} e^{j[\frac{2\pi}{\lambda} \sin \theta (x_k \cos \phi + y_k \sin \phi) + \beta_k]} \quad (1)$$

其中, $A_k$ 为第 $k$ 个节点的辐射功率系数; $f_k$ 为该节点经天线轴角度偏移 $(\Delta\phi_k, \Delta\theta_k)$ 后的方向图函数:

$$f(\phi, \theta)_{\Delta\phi, \Delta\theta} = |2(\sin \theta \cos \phi \sin \Delta\theta \cos \Delta\phi + \sin \theta \sin \phi \sin \Delta\theta \sin \Delta\phi + \cos \theta \cos \Delta\theta)^3 - \sin \theta \cos \phi \sin \Delta\theta \cos \Delta\phi - \sin \theta \sin \phi \sin \Delta\theta \sin \Delta\phi - \cos \theta \cos \Delta\theta| \quad (2)$$

$x_k, y_k$ 为其横纵坐标; $\beta_k$ 为信号发射时的初始相位(由假设②,各点的 $\beta_k$ 一致).各个节点的天线轴在 $\phi$ 方向上的轴偏角度 $\Delta\phi$ 服从均匀分布,在 $\theta$ 方向上的轴偏角度 $\Delta\theta$ 服从高斯分布.

图2所示的是一个 $7 \times 7$ 的节点群,网格间距为 $0.5 \lambda$ 时,在 $\Delta\theta \in N(0, \pi/20)$ 、 $N(0, 2\pi/20)$ 和 $N(0, 3\pi/20)$ 三种不同情况下, $\phi = 90^\circ$ 面上的合成波束功率方向图.为方便对比,还给出了不存在天线轴角度偏移时的方向图.从图2中可以发现,节点天线轴角度的偏移带来了辐射能量在整个空间上的更广泛分布,随着天线轴偏移误差的加剧,主瓣能量逐渐降低,而旁瓣区域的平均能量水平缓慢提升.

以 $\Delta\theta \in N(0, 3\pi/20)$ 为例,由高斯分布的累积

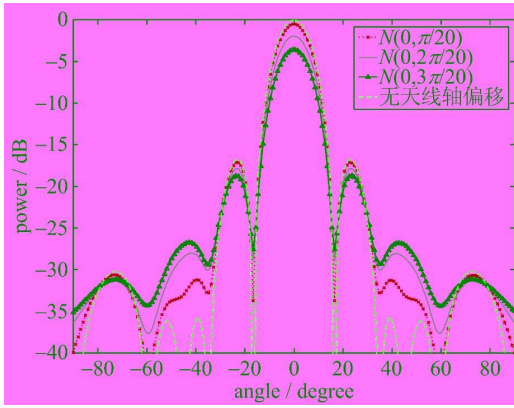


图 2 天线轴偏移的影响 ( $\phi = 90^\circ$  方向)

Fig. 2 Influence of antenna beam inclination ( $\phi = 90^\circ$ )

分布函数可知:

$$C(x) = 1 - \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[ \frac{x - m}{\sqrt{2}\sigma} \right] \quad (3)$$

在此分布下, 出现  $|\Delta\theta| < 60^\circ$  的概率为 78.65%。由于合成波束在  $\phi$  方向上并不对称, 特给出此时的 3 维合成波束方向图。如图 3 所示,  $\phi = 45^\circ$  方向上旁瓣的能量水平极低, 即使在  $\phi = 90^\circ$  方向上, 主旁瓣峰值之差也有 15 dB, 基本上可以满足一般通信的需要。

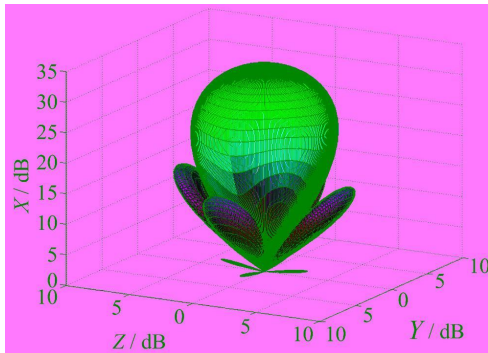


图 3 3 维合成波束 ( $\Delta\theta \in N(0, 3\pi/20)$ )

Fig. 3 3D combined beam pattern ( $\Delta\theta \in N(0, 3\pi/20)$ )

## 2.2 WSN 中特有的影响因素

本文应用的场景是在无线传感器网络当中, 相比常见的天线阵列系统, 有许多自身特有的因素需要考虑。这里主要分析和讨论无线传感器网络中常见的节点失效问题和节点布撒过程中的位置误差因素对整个合成波束特性的影响。继续以  $7 \times 7$  的网格阵列为例, 为方便比较, 仍假设节点的 antenna 轴偏移角度在  $\phi$  方向上均匀, 在  $\theta$  方向上  $\Delta\theta \in N(0, 3\pi/20)$ 。

### 2.2.1 节点失效

无线传感器网络中, 由于节点电源耗尽或是受

到周围环境破坏等因素影响, 经常会遇到节点失效的问题。

文献[7]认为, 一个理想的  $M \times N$  天线阵列, 节点失效造成的主瓣增益相对损失满足下式

$$L_f = \left[ \frac{M'N'}{MN} \right]^2 \quad (4)$$

其中,  $MN$  是阵列的总节点数;  $M'N'$  是正常工作的节点数。

图 4 给出了存在天线轴偏移误差时不同节点失效情况下的合成波束功率方向图。当存在 10 个失效节点时, 主瓣峰值降低了 1.97 dB; 失效节点数增加到 15 个时, 主瓣峰值降低了 3.17 dB; 而当失效节点数等于 20, 即接近总节点数目一半时, 主瓣峰值降低了 4.54 dB。从图 4 中可以发现, 随着失效节点的增加, 主瓣波形和 3 dB 波束宽度并没有太大变化, 只是主瓣和旁瓣区域的能量等级呈逐渐降低趋势。仿真结果得到的主瓣增益相对损失  $L_f$  也与式 (4) 的理论值基本吻合, 节点 antenna 轴角度的偏移并未给节点失效因素引入新的变化。

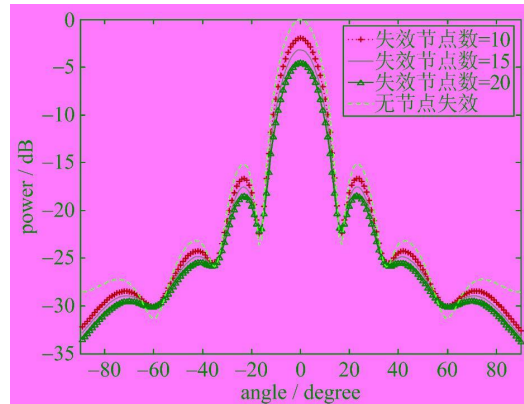


图 4 节点失效的影响 ( $\phi = 90^\circ$  方向)

Fig. 4 Influence of node failure ( $\phi = 90^\circ$ )

### 2.2.2 节点位置误差

传感器节点在布撒的过程中一般会出现位置误差, 进而影响到整个阵列的合成波束特性。假设通过 WSN 的各种定位算法, 在进行波束合成之前, 传感器网络内部已经获知了各个节点之间的相对位置关系。

为方便分析, 取各个节点的位置误差以理想位置为中心, 服从高斯分布。文献[7]认为对于一个  $M \times N$  的等权重天线阵列, 节点幅度和相位误差对旁瓣电平的影响应该满足

$$\Delta_s = \frac{1}{MN} \left[ e^{\sigma_p^2} \left( 1 + \frac{\sigma_a^2}{I^2} \right) - 1 \right] \quad (5)$$

其中,  $\alpha_a$  是幅度误差的方差 ( $\text{volts}^2$ );  $\alpha_p$  是相位误差的方差 ( $\text{rad}^2$ ), 服从高斯分布.

由式(1)可得, 节点位置误差对于合成波束的影响主要集中在相位项上, 具体相位误差满足

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \sin \theta (\Delta x \cos \phi + \Delta y \sin \phi) \quad (6)$$

其不仅受到节点位置误差的影响, 还与相应的方位角有关.  $\Delta x$ 、 $\Delta y$  服从以理想位置为中心的高斯分布. 对不同误差等级下的合成波束功率方向图作了仿真分析, 比较结果如图5所示.

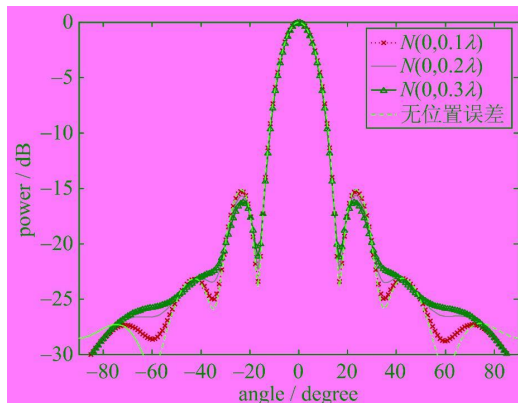


图5 节点位置误差对合成波束的影响 ( $\phi = 90^\circ$  方向)

Fig.5 Influence of node position error ( $\phi = 90^\circ$ )

首先, 合成波束的主瓣特性并没有受到位置误差的显著影响, 3 dB 波束宽度和主瓣最高增益均保持不变. 这点从式(6)中也可以得到: 主瓣对应的是  $\theta$  较小的一段区域,  $\Delta x$ 、 $\Delta y$  对相位项的影响由于  $\sin \theta$  这个小量的存在而被大幅削弱了.

其次, 旁瓣区域的幅度变化并非如式(5)所描述的那样随着位置误差的增大而简单递增. 图5中, 旁瓣区域变化最为明显的地方在于原有各波瓣之间的波谷区域, 位置误差的影响使得该区域的平均能量水平逐渐提升, 波谷被填满. 在  $\phi = 90^\circ$  面上, 考察最低波谷的位置(本例中为  $\theta = 56^\circ$ ), 当节点位置误差由  $N(0, 0.1\lambda)$  增大到  $N(0, 0.2\lambda)$  和  $N(0, 0.3\lambda)$  的过程中, 相位误差的方差分别增大了4和9倍. 对应式(5), 此处的能量水平应该相应提升6.02 dB和9.54 dB. 而实际仿真的结果显示, 此处的能量水平只提升了1.68 dB和2.59 dB. 这说明, 天线轴角度偏移的引入, 使得位置误差对于合成波束功率方向图的影响不再符合理想  $M \times N$  天线阵中的模式. 由于各个节点波束能量在立体空间中分布的扩散化, 节点位置误差所引起的旁瓣区域能量水平提升的幅度要小于原有的理论值, 而更加表现为一种“削峰填

谷”式的能量等级平滑.

### 3 辐射功率调整

针对各种因素对合成波束功率方向图的影响, 我们曾经考虑过对节点辐射功率和初相位进行一定调整, 用以减小天线轴角度偏移造成的影响<sup>[8]</sup>. 原有的辐射功率调整策略较为简单, 本文根据节点天线模型的特性和合成波束方面的要求, 对调整策略做进一步的细化.

本文选用的节点天线半功率波瓣宽度  $\text{HPBW} = 20.5^\circ$ , 第一零点波束宽度  $\text{FNBW} = \pm 45^\circ$ , 传感器网络与远端接收装置的通信角度定在  $\theta \in (-20^\circ, 20^\circ)$ . 根据各个节点反馈的天线轴偏移角度, 将节点按  $|\Delta\theta|$  分为3个区, 调整节点的辐射功率

$$A_k = \begin{cases} 1, & |\Delta\theta_k| \leq 20^\circ \\ \frac{1}{2} \left[ 1 - \cos \left[ \frac{9}{2} (|\Delta\theta| - 60^\circ) \right] \right], & 20^\circ < |\Delta\theta_k| < 60^\circ \\ 0, & |\Delta\theta_k| \geq 60^\circ \end{cases} \quad (7)$$

其中,  $|\Delta\theta| \leq 20^\circ$  时, 节点天线波束主要集中作用于合成波束的主瓣部分, 所以不调整它的辐射功率;  $20^\circ < |\Delta\theta| < 60^\circ$  时, 节点对主瓣的贡献逐渐减弱, 而对旁瓣区域的影响逐渐增强, 这一区域的辐射功率也应随着  $|\Delta\theta|$  的增大而适当降低;  $|\Delta\theta| \geq 60^\circ$  时, 该节点对于通信角度  $\theta \in (-20^\circ, 20^\circ)$  范围内已基本没有贡献, 因而选择关闭其天线, 以节省该传感器节点的能量.

图6为  $7 \times 7$  阵列中,  $\Delta\theta \in N(0, 3\pi/20)$ , 节点位置误差服从  $N(0, 0.3\lambda)$  情况下的辐射功率调整结果. 旁瓣区域的能量等级得到进一步的降低, 而主瓣

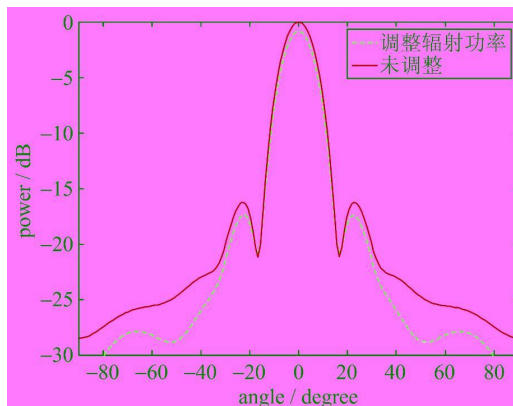


图6 辐射功率调整结果 ( $\phi = 90^\circ$  面,  $d = 0.5\lambda$ )

Fig.6 Result of radiation power adjustment

( $\phi = 90^\circ$ ,  $d = 0.5\lambda$ )

特性几乎没有受到影响,最大增益仅比未调整时降低了 0.85 dB.而且对于天线轴偏移误差越大的情况,这种辐射功率上的调整方法效果越为明显.

#### 4 节点间距扩展以增大覆盖面积

根据无线传感器网络应用场景的不同,除了节点间距为半波长左右的密集分布外,当需要增大网络覆盖范围又不希望增加节点数量时,可以通过适当的扩展节点之间的距离,构成稀疏阵列来达到目的.

在  $7 \times 7$  阵列中,当节点间距扩展到  $1.5 \lambda$  时,网络的覆盖面积扩大到原来的 9 倍.选用各向同性天线和定向天线两种不同情况下合成波束功率方向图的对比如图 7 所示.由于本文选用的是拥有较低旁瓣的定向天线,合成波束在旁瓣区域的能量水平受到一定程度的“衰减”,特别是在各向同性天线阵中出现的与主瓣等幅度的高电平旁瓣,由于出现的角度位于所选节点天线的旁瓣区域(节点天线  $\text{HPBW} = \pm 20.5^\circ$ ,  $\text{FNBW} = \pm 45^\circ$ ),其影响被大幅削弱.这种旁瓣削弱效果对节点间距为  $1\lambda$  这样半波长的偶数倍情况一样适用,只是主瓣宽度稍有不同.由此可见,与传统的各向同性天线相比,选用拥有较低旁瓣的定向天线,可以更好地抑制合成波束的旁瓣电平.

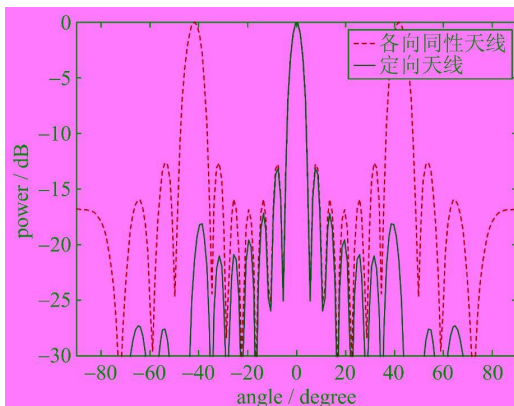


图 7 合成波束方向图 ( $\phi = 90^\circ$ ,  $d = 1.5\lambda$ )

Fig.7 Combined beam pattern ( $\phi = 90^\circ$ ,  $d = 1.5\lambda$ )

对  $1.5\lambda$  间距的  $7 \times 7$  阵列引入天线轴偏移误差和节点位置误差进行分析,取  $\Delta\theta \in N(0, 3\pi/20)$ , 节点位置误差服从  $N(0, 0.3\lambda)$  分布,合成波束功率方向图如图 8 所示.其中,主瓣的零点波束宽度缩小到  $\pm 5^\circ$ ,主旁瓣峰值之差减小到 13 dB,基本可以满足一般通信的需要.但是,主瓣宽度的变窄也将给调整

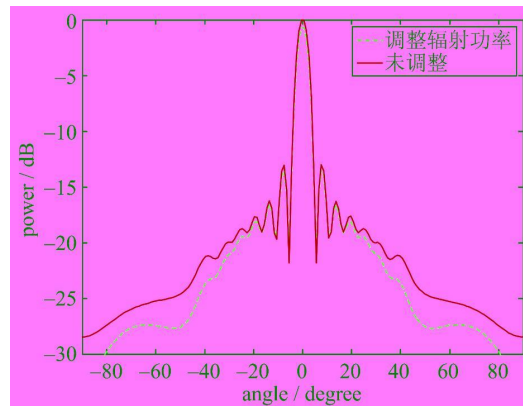


图 8 合成波束方向图 ( $\Delta\theta \in N(0, 3\pi/20)$ , 位置误差  $\in N(0, 0.3\lambda)$ ,  $d = 1.5\lambda$ )

Fig.8 Combined beam pattern ( $\Delta\theta \in N(0, 3\pi/20)$ , position error  $\in N(0, 0.3\lambda)$ ,  $d = 1.5\lambda$ )

节点辐射功率等性能优化工作造成新的困难.

经研究发现,这种节点间距扩展受到所选用天线波瓣特性的限制.根据天线理论<sup>[6]</sup>,对于一个节点间距为  $p\lambda$  的  $M \times N$  各向同性天线阵列,其  $\phi = 90^\circ$  方向上与主瓣等幅度的第一旁瓣中心所出现的角度为

$$\theta = \arcsin\left[\frac{1}{p}\right] \quad (8)$$

随着节点间距  $p\lambda$  的增大,该类干扰旁瓣的位置将逐渐向主瓣中心靠近.虽然节点天线轴偏移和位置误差等因素将对  $\theta$  的实际位置带来一定影响,不过以此理论值为参考,可以进一步分析节点间距扩展范围与天线波瓣特性之间的相互关系.

以本文选用的定向天线为例,当  $7 \times 7$  阵列的节点间距扩展到  $2\lambda$  时,对应  $\theta$  的位置出现在  $\pm 30^\circ$ ,已进入所选用定向天线主瓣的高电平区域(如图 9 所

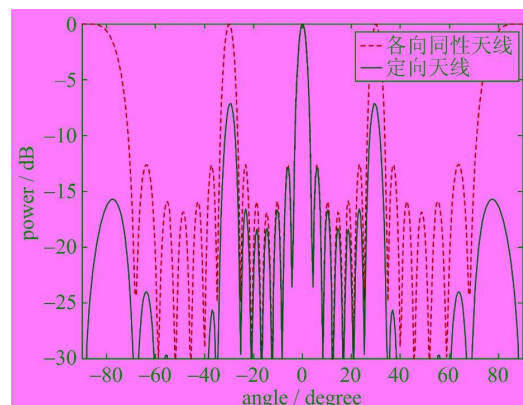


图 9 合成波束方向图 ( $\phi = 90^\circ$ ,  $d = 2\lambda$ )

Fig.9 Combined beam pattern ( $\phi = 90^\circ$ ,  $d = 2\lambda$ )

示),因而这两个旁瓣受到的“衰减”程度有限,导致主旁瓣峰值之差减小到 7.14 dB,这将对通信性能造成不利的影响.对于特定的定向天线,可以根据其主瓣的波瓣特性和相关通信性能方面的要求,确定一个临界角度  $\theta_0$ .节点间距的扩展需要保证相应的  $\theta'$  不进入主瓣的高电平区域,即满足  $\theta' > \theta_0$ ,结合式(8)可以得到

$$0.5\lambda < p\lambda < \frac{1}{\sin \theta_0} \lambda \quad (9)$$

其中,节点间距  $p\lambda$  可以取满足式(9)的任意距离,而不需要一定是  $0.5\lambda$  的整数倍.

如果需要进一步增大节点间距,可以根据式(8)、式(9),选用主瓣宽度更窄的定向天线.当然,这样也将对天线轴角度偏移等问题带来更多限制.

## 5 结论

与以往的各向同性天线不同,本文分析中采用了定向天线,获得了一些新的有益结论:节点天线轴角度偏移导致了辐射能量在空间中分布的扩散,引起合成波束主瓣电平的降低,并造成旁瓣区域能量水平的提升以及抗干扰能力的下降;由研究比较发现,当存在天线轴偏移时,节点位置误差所造成的旁瓣电平提升的幅度低于采用各向同性天线时的情况;由于节点选用定向天线,在一定范围内可以通过扩展节点间距来增大网络覆盖面积,该扩展范围与所选用天线的波瓣特性有相对固定的约束关系.而传感器节点的失效虽然造成了合成波束整体能量水平的降低,但是基本的波束形状并没有太大变化.这些结果有助于进一步研究 WSN 在选取节点组成天线阵时的组阵策略以及对合成波束各项性能的优化

工作.

根据节点反馈的天线轴偏移角度,本文通过分区调整各节点的辐射功率等级,在保持原有主瓣特性的基础上,有效地降低了旁瓣的能量水平.但目前的分区调整策略还稍显粗放,后续工作中将继续探讨更加细致优化的节点辐射功率和相位调整策略.

## 参考文献 (References)

- [1] 孙利民,李建中,陈渝,等. 无线传感器网络[M]. 北京:清华大学出版社,2005.
- [2] Meier A, Thompson J S. Cooperative diversity in wireless networks [C]//IEEE International Conference on 3G and Beyond. 2005:1-5.
- [3] 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):4 110-4 124.
- [4] Barriac G, Mudumbai R, Madhoo U. Distributed beamforming for information transfer in sensor networks [C]//Information Processing in Sensor Networks. Berkeley, California, USA, 2004: 81-88.
- [5] Tummala M, Chan C W, Vincent P. Distributed beamforming in wireless sensor networks [C]//Signals, Systems and Computers Conference. Monterey, CA, 2005: 793-797.
- [6] Kraus J D, Marhefka R J. Antennas: For All Applications [M]. 3rd ed. McGraw-Hill, 2002.
- [7] Litva J, Titus Kwok-Yeung Lo. Digital Beamforming in Wireless Communications [M]. Artech House, 1996.
- [8] 刘发林,尤览. 无线传感器网络中的协同波束合成 [C]//全国微波毫米波会议. 宁波,2007:1 410-1 413.