

高精度低复杂度的无线定位新方法

杨小凤*, 陈铁军, 刘 峰

(玉林师范学院 电子与通信工程学院, 广西 玉林 537000)

(* 通信作者电子邮箱 yy2822205@163.com)

摘 要:针对高精度的无线定位算法普遍存在运算量较大的问题,提出了一种二维波束空间矩阵束算法进行波达时间(TOA)和波达方向(DOA)联合估计,能够以较低的复杂度准确定位目标。该算法先通过离散傅里叶变换(DFT)波束形成矩阵将阵元空间的接收数据复数矩阵变换成波束空间的降维实数矩阵,使得运算量大幅度降低;再通过奇异值分解和求矩阵对的广义特征值估计视距信号 TOA 和 DOA,从而确定目标位置。Matlab 仿真实验结果证明,这种定位方法的均方根误差最好达到 0.4 m,运算量不到阵元空间对应算法的 1/4,是一种高精度低复杂度的无线定位方法,尤其适用于资源有限的特殊环境(如战场、地震灾区、偏远山区等)中的无线网络定位。

关键词:无线定位;波束空间;波达时间;波达方向

中图分类号: TN911.7 **文献标志码:** A

New wireless positioning method with high accuracy and low complexity

YANG Xiaofeng*, CHEN Tiejun, LIU Feng

(College of Electronics and Communications Engineering, Yulin Normal University, Yulin Guangxi 537000, China)

Abstract: In order to lower the computational burden of wireless positioning algorithm with high accuracy, this paper proposed a new 2D beamspace matrix pencil algorithm to jointly estimate Time-Of-Arrival (TOA) and Direction-Of-Arrival (DOA), which can position target accurately with low complexity. This algorithm first transformed the complex data matrix into real and reduced dimensional matrix via Discrete Fourier Transform (DFT) matrix, which significantly reduced the computational burden; then estimated TOA and DOA of Line-of-Sight signal for positioning via singular value decomposition and solving generalized eigenvalues of matrix pencils. Matlab simulation results prove that this positioning method achieves Root Mean Square Error (RMSE) as small as 0.4 m with computation cost no more than 1/4 of corresponding algorithm in element space, which makes it a promising positioning method for resource limited environments like battlefield, earthquake-stricken area and rural places.

Key words: wireless positioning; beamspace; Time-Of-Arrival (TOA); Direction-Of-Arrival (DOA)

0 引言

无线定位广泛应用于人们日常生活的诸多领域:紧急呼叫^[1]、交通导航^[2]、消防队跟踪调度^[3]等。近年来,基于波达时间(Time-Of-Arrival, TOA)和波达方向(Direction-Of-Arrival, DOA)联合估计的无线定位算法备受关注^[4-6]。这类算法只需要一个基站就可以准确估计出视距信号到达时间参数和角度参数,从而确定目标位置,系统的复杂度较低。其中最著名的高精度算法有:信号到达角度和时间联合估计—多重信号分类算法(Joint Angle and Delay Estimation-Multiple Signal Classification, JADE-MUSIC)^[7],信号到达角度和时间联合估计—旋转不变子空间算法(Joint Angle and Delay Estimation-Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques, JADE-ESPRIT)^[8]等。2013年,文献[9]将高精度的二维矩阵束算法^[10](2D Matrix Pencil, 2DMP)应用于 TOA 和 DOA 联合估计,该算法不像 JADE-MUSIC 和 JADE-ESPRIT 那样需要估计接收信号的协方差矩阵,而是直接处理接收信号样本,具有运算量较小、运算速度较快的优势。

本文提出一种二维波束空间矩阵束算法进行 TOA 和 DOA 联合估计,可以进一步降低算法复杂度。通过离散傅里叶变换(Discrete Fourier Transform, DFT)波束形成矩阵将阵元空间的接收数据复数矩阵变换成波束空间的降维实数矩阵,再修改 2DMP 算法估计视距信号 TOA 和 DOA,从而确定目标位置。由于算法处理的数据矩阵从复数变成实数,并且维数降低,使得该算法比 2DMP 算法的运算量更小。仿真实验也表明这是一种高精度低复杂度的无线定位方法。

1 信号模型

本文中的定位系统由一个待定位目标和一个带有阵元数为 M 的均匀线阵的基站组成,阵元间距 $d = \lambda/2$, λ 为波长。设信号源 $s(n)$ 为窄带远场信号,经 P 条路径传播被均匀线阵接收,将接收信号在频域上以 $\Delta f = B/N$ (B 为信号带宽)的采样速率进行采样,则第 m 个阵元上接收到的信号可表示为:

$$r_m(n) = s(n) \sum_{p=1}^P \alpha_p e^{-j \frac{2\pi m d \sin \theta_p}{\lambda}} e^{-j 2\pi n \Delta f \tau_p} + w_m(n) \quad (1)$$

由式(1)可得:

收稿日期:2013-08-19;修回日期:2013-10-14。

基金项目:广西高校科学技术研究项目(2013LX118);广西高校科学技术研究重点项目(2013ZD055)。

作者简介:杨小凤(1984-),女,广西玉林人,讲师,硕士,主要研究方向:无线定位算法、阵列信号处理; 陈铁军(1966-),男,湖北襄阳人,教授,主要研究方向:无线网络、嵌入式系统; 刘峰(1969-),男,广西玉林人,高级工程师,主要研究方向:通信理论、集成电路。

$$z_m(n) = \frac{r_m(n)}{s(n)} = \sum_{p=1}^P \alpha_p e^{-j\frac{2\pi d \sin \theta_p}{\lambda}} e^{-j2\pi n \Delta \tau_p} + \frac{w_m(n)}{s(n)} \quad (2)$$

其中: α_p 、 θ_p 、 τ_p 分别是第 p 条路径的衰减幅度(服从瑞利分布)、到达方向和时延; $w_m(n)$ 为均值零方差 σ^2 的加性高斯白噪声; $0 \leq m \leq M-1$; $0 \leq n \leq N-1$ 。

令

$$x_p = e^{-j\frac{2\pi d \sin \theta_p}{\lambda}} = e^{j\mu_p} \quad (3)$$

$$y_p = e^{-j2\pi \Delta \tau_p} = e^{j\nu_p} \quad (4)$$

只要估计出 x_p 和 y_p , 或 μ_p 和 ν_p , 就能估计出 θ_p 和 τ_p , 从而计算出目标的位置:

$$(\hat{X}, \hat{Y}) = (c\tau_1 \sin \theta_1, c\tau_1 \cos \theta_1) \quad (5)$$

其中 c 为光速。

2 2DMP 算法及应用

用 $z_m(n)$ 组成如下矩阵:

$$\mathbf{D}_m = \begin{bmatrix} z_m(0) & z_m(1) & \cdots & z_m(N-L) \\ z_m(1) & z_m(2) & \cdots & z_m(N-L+1) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ z_m(L-1) & z_m(L) & \cdots & z_m(N-1) \end{bmatrix}_{L \times (N-L+1)} \quad (6)$$

用 \mathbf{D}_m 组成如下矩阵:

$$\mathbf{D}_e = \begin{bmatrix} \mathbf{D}_0 & \mathbf{D}_1 & \cdots & \mathbf{D}_{M-K} \\ \mathbf{D}_1 & \mathbf{D}_2 & \cdots & \mathbf{D}_{M-K+1} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \mathbf{D}_{K-1} & \mathbf{D}_K & \cdots & \mathbf{D}_{M-1} \end{bmatrix}_{KL \times (M-K+1)(N-L+1)} \quad (7)$$

其中 L 和 K 应该满足^[10]: $(K-1)L \geq P$, $K(L-1) \geq P$ 和 $(M-K+1)(N-L+1) \geq P$ 。

用 \mathbf{D}_e 和互换矩阵 \mathbf{H} 组成如下矩阵:

$$\mathbf{D}_{ex} = [\mathbf{D}_e, \mathbf{H}\mathbf{D}_e^* \mathbf{H}]_{KL \times 2(M-K+1)(N-L+1)} \quad (8)$$

对 \mathbf{D}_{ex} 进行奇异值分解:

$$\mathbf{D}_{ex} = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^H = \mathbf{U}_s \mathbf{\Sigma}_s \mathbf{V}_s^H + \mathbf{U}_n \mathbf{\Sigma}_n \mathbf{V}_n^H \quad (9)$$

其中 \mathbf{U}_s 为最大的 P 个左奇异矢量张成的信号子空间, \mathbf{U}_n 为其余的左奇异矢量张成的噪声子空间。

用 \mathbf{U}_s 定义如下矩阵:

$$\mathbf{U}_{sp} = \mathbf{C}\mathbf{U}_s \quad (10)$$

其中:

$$\mathbf{C} = [\mathbf{S}(1), \mathbf{S}(1+L), \cdots, \mathbf{S}(1+(K-1)L), \mathbf{S}(2), \mathbf{S}(2+L), \cdots, \mathbf{S}(2+(K-1)L), \cdots, \mathbf{S}(L), \mathbf{S}(L+L), \cdots, \mathbf{S}(L+(K-1)L)]^T \quad (11)$$

$\mathbf{S}(i)$ 是大小为 KL 的行向量, 其第 i 个元素为 1, 其余元素为 0。

考虑矩阵束:

$$\mathbf{U}_{sp2} - y\mathbf{U}_{sp1} \quad (12)$$

其中 \mathbf{U}_{sp1} 为 \mathbf{U}_{sp} 删除后 K 行得到, \mathbf{U}_{sp2} 为 \mathbf{U}_{sp} 删除前 K 行得到。

y_p 就是矩阵对 $(\mathbf{U}_{sp1}, \mathbf{U}_{sp2})$ 的广义特征值^[9]。再通过式(4)可以计算出 τ_p , 最小值即视距信号 TOA。

考虑另一矩阵束:

$$\mathbf{U}_{s2} - x\mathbf{U}_{s1} \quad (13)$$

其中: \mathbf{U}_{s1} 为 \mathbf{U}_s 删除后 L 行得到, \mathbf{U}_{s2} 为 \mathbf{U}_s 删除前 L 行得到。

x_p 就是矩阵对 $(\mathbf{U}_{s1}, \mathbf{U}_{s2})$ 的广义特征值^[9], 再通过式(3)可以计算出视距信号 DOA。

3 二维波束空间矩阵束算法及应用

本文提出一种二维波束空间矩阵束算法进行 TOA 和 DOA 联合估计, 通过 DFT 波束形成矩阵将阵元空间的接收数据复数矩阵变换成波束空间的降维实数矩阵, 再修改 2DMP 算法估计视距信号 TOA 和 DOA, 从而确定目标位置, 可以进一步降低算法复杂度。

定义 $K \times K$ 和 $L \times L$ 的 DFT 波束形成矩阵 \mathbf{W}_K 和 \mathbf{W}_L , 第 k 行 \mathbf{W}_K^H 和第 l 行 \mathbf{W}_L^H 分别为:

$$\mathbf{w}_k^H = e^{j(\frac{K-1}{2})k\frac{2\pi}{K}} [1 \quad e^{-jk\frac{2\pi}{K}} \quad \cdots \quad e^{-j(K-1)k\frac{2\pi}{K}}] \quad (14)$$

$$\mathbf{w}_l^H = e^{j(\frac{L-1}{2})l\frac{2\pi}{L}} [1 \quad e^{-jl\frac{2\pi}{L}} \quad \cdots \quad e^{-j(L-1)l\frac{2\pi}{L}}] \quad (15)$$

\mathbf{w}_k^H 、 \mathbf{w}_l^H 分别表示波束主瓣指向 $\mu = k\frac{2\pi}{K}$ 和 $\nu = l\frac{2\pi}{L}$ 。可

以根据 DOA 先验估计值范围选取 \mathbf{W}_K^H 中的连续 R 行 \mathbf{W}_{KR}^H ($R \leq K$) 和 \mathbf{W}_L^H 通过如下运算将 \mathbf{D}_e 变换到波束空间:

$$\mathbf{D} = (\mathbf{W}_{KR}^H \otimes \mathbf{W}_L^H) \mathbf{D}_e \quad (16)$$

其中 \otimes 为 Kronecker 积运算。 \mathbf{D} 的维数相对 \mathbf{D}_e 降低为 $RL \times (M-K+1)(N-L+1)$, 从而降低了算法处理的数据量。

对 $[\text{Re}(\mathbf{D}), \text{Im}(\mathbf{D})]$ (实数矩阵) 进行奇异值分解, \mathbf{E}_s 为最大的 P 个左奇异矢量。从此处开始算法进行的都是实数运算, 因此大大降低了复杂度。

定义如下矩阵:

$$\mathbf{T}_1 = \begin{bmatrix} 1 & \cos \frac{\pi}{L} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \cos \frac{\pi}{L} & \cos \frac{2\pi}{L} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \cos \frac{2\pi}{L} & \cos \frac{3\pi}{L} & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \frac{3\pi}{L} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ (-1)^L & 0 & 0 & 0 & \cdots & \cos \left[(L-1) \frac{\pi}{L} \right] \end{bmatrix}_{L \times L} \quad (17)$$

$$\mathbf{T}_2 = \begin{bmatrix} 0 & \sin \frac{\pi}{L} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \sin \frac{\pi}{L} & \sin \frac{2\pi}{L} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \sin \frac{2\pi}{L} & \sin \frac{3\pi}{L} & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sin \frac{3\pi}{L} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & \sin \left[(L-1) \frac{\pi}{L} \right] \end{bmatrix}_{L \times L} \quad (18)$$

从 \mathbf{T}_1 中选取 $(L-1) \times L$ 的 \mathbf{T}_{1R} , 从 \mathbf{T}_2 中选取 $(L-1) \times L$ 的 \mathbf{T}_{2R} , $\mathbf{T}_{v1} = \mathbf{I}_R \otimes \mathbf{T}_{1R}$, $\mathbf{T}_{v2} = \mathbf{I}_R \otimes \mathbf{T}_{2R}$, \mathbf{I}_R 为 $R \times R$ 单位矩阵;

则 $\tan \frac{\nu}{2}$ 就是矩阵对 $(\mathbf{T}_{v1}\mathbf{E}_s, \mathbf{T}_{v2}\mathbf{E}_s)$ 的广义特征值^[11], 再通过式(4)可以计算出 τ_p , 最小值即视距信号 TOA。

将 \mathbf{T}_1 中的 L 用 K 代替得到 \mathbf{T}_3 , 将 \mathbf{T}_2 中的 L 用 K 代替得到 \mathbf{T}_4 , 对应 \mathbf{W}_{KR}^H 从 \mathbf{W}_K^H 中选取的行数, 从 \mathbf{T}_3 中选取 $(R-1) \times R$ 的

T_{3R} , 从 T_4 中选取 $(R-1) \times R$ 的 T_{4R} , $T_{\mu 1} = T_{3R} \otimes I_L$, $T_{\mu 2} = T_{4R} \otimes I_L$, I_L 为 $L \times L$ 单位矩阵; 由 μ_p 与 v_p , $T_{\mu 1}$ 与 T_{v1} , $T_{\mu 2}$ 与 T_{v2} 在结构上的相似性可推论出 $\tan \frac{\mu_p}{2}$ 就是矩阵对 $(T_{\mu 1} E_s, T_{\mu 2} E_s)$ 的广义特征值, 再通过式(3)可以计算出视距信号 DOA。

4 仿真实验及性能分析

4.1 算法估计精度分析

为了验证本文算法在估计精度上的优越性, 本文给出 Matlab 仿真实验结果及性能分析。采用前文所述信号模型, 阵元数 $M=8$, 采样点数 $N=48$, 路径数 $P=3$, 设各路径的时延 $\tau_p = [167, 277, 467]$ ns, 各路径的到达方向 $\theta_p = [-60, -20, 30]^\circ$; $L = N/3 = 16$, $K = M - 2 = 6$; 设 DOA 先验估计值范围为 $-90^\circ \sim 0^\circ$, 可以选取 W_K^H 中的后 3 个连续波束作波束空间变换, 即 $R=3$; 同时给出选取全部 6 个波束的情况 ($R=6$) 作为对比。在不同的信噪比下分别进行 100 次独立实验, 得到 TOA 估计和 DOA 估计的均方根误差曲线如图 1 和图 2 所示。

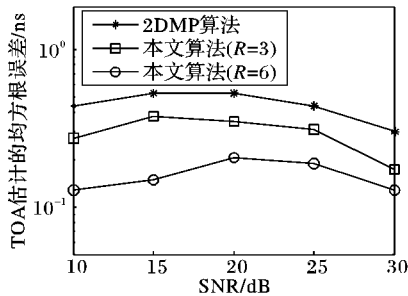


图1 TOA估计精度比较

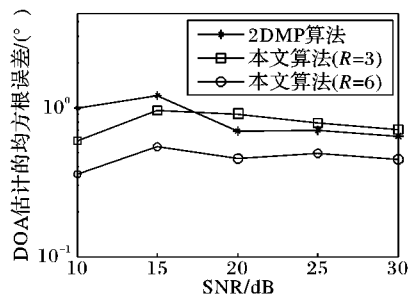


图2 DOA估计精度比较

从图1、2中可以看出, 本文算法的 TOA 和 DOA 估计精度随着 R 取值的增大而提高。图1表明本文算法的 TOA 估计精度比 2DMP 算法高, 估计的均方根误差最好达到 0.1 ns 级别; 图2表明在较低 SNR 的情况下, 本文算法的 DOA 估计精度比 2DMP 算法高, 估计的均方根误差最好达到 0.3° , 在较高信噪比 (Signal-to-Noise Ratio, SNR) 的情况下, 两种算法的估计精度相当 ($R=3$)。波束空间算法在降低了阵元空间算法复杂度的情况下提高估计精度的仿真结果在文献[12-14]中也有出现, 这种现象可以解释为波束空间算法利用了 DOA 先验估计值范围来形成波束指向更接近信号源的方向, 增强了信号源方向附近的信号, 也就是利用有效信息通常能提高估计精度^[12-13]。

下面分别用两种算法进行定位实验。设基站位于坐标平面原点, 目标位于坐标平面 $(-43 \text{ m}, 25 \text{ m})$ 处 (根据视距信号的时延和到达方向确定)。在不同的信噪比下分别进行 100 次独立实验, 得到两种算法对目标位置估计的均方根误差曲线如图3所示。从图3可以看出: 在较低 SNR 的情况下, 本文算法的定位精度比 2DMP 算法高, 在较高 SNR 的情况下,

两种算法的定位精度相当 ($R=3$); 本文算法的定位精度随着 R 取值的增大而提高, 定位的均方根误差最好达到 0.4 m。仿真实验表明了利用本文算法进行无线定位的有效性和可行性, 其定位精度要优于 2DMP 算法。

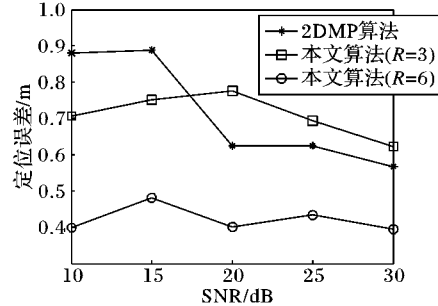


图3 定位精度比较

4.2 算法复杂度分析

以算法中使用的实数乘法运算的个数 (Number Of Multiplications, NOM) 作为算法复杂度的度量, 每次复数乘法运算相当于 4 次实数乘法运算。

这两种算法中运算量最大的一步均为对接收数据矩阵进行奇异值分解。在 2DMP 算法中, 接收数据矩阵 D_{ex} 是一个 $KL \times 2(M-K+1)(N-L+1)$ 的复数矩阵, 对其进行奇异值分解的 NOM^[15] 为 $4 \times [11(KL)^3 + 4(KL)^2 FG]$ ($F = M - K + 1$, $G = N - L + 1$); 在本文算法中, 接收数据矩阵 D 是一个 $RL \times 2(M-K+1)(N-L+1)$ 的实数矩阵, $R \leq K$, 进行奇异值分解的 NOM^[15] 为 $11(RL)^3 + 4(RL)^2 FG$ 。以 4.1 节中数据为例, 定义 Q 为本文算法和 2DMP 算法进行奇异值分解所需 NOM 的比率, 则

$$Q = \frac{R^3}{1188} + \frac{R^2}{528} \quad (19)$$

作 Q 与选取波束个数 R ($3 \leq R \leq 6$) 的关系图如图4所示。从图4中可以看出, Q 的最大值为 0.25, 即本文算法的运算量不超过 2DMP 算法的 1/4。

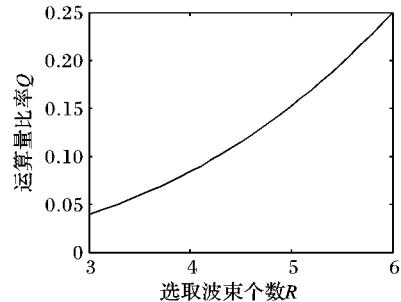


图4 两种算法的运算量比率

5 结语

本文提出了一种基于二维波束空间矩阵束算法的联合 TOA 和 DOA 估计方法, 并将其应用于无线定位。该算法的主要优点在于: 不需要构造协方差矩阵, 算法处理的均为实数数据, 运算量较小, 仅需一个基站即可准确估计目标位置, 大大降低了系统复杂度。Matlab 仿真实验表明, 这种方法的估计精度高, 能够准确估计目标位置, 是一种简单有效的无线定位方法。

参考文献:

- [1] MAYORGA C, DELLA ROSE F. Cooperative positioning techniques for mobile localization in 4G cellular networks[C]// Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Pervasive Services. Piscataway: IEEE, 2007: 39-44. (下转第337页)

参考文献:

- [1] MAHAN J L. Wideband HF IP experimentation[EB/OL]. [2013-06-10]. http://www.hfindustry.com/meetings_presentations/presentation_materials/2012_jan_hfia/presentations/08_Wideband_HF_IP_AFCEA-SPAWAR-Martin-Jose-James-Steve.pdf.
- [2] ACIMS. SCOPE COMMAND NetSim2 - GenetScope software user's manual[K]. Tucson: University of Arizona Department of Electrical and Computer Engineering, 2007.
- [3] CAO P, HUANG G, JING Y, *et al.* QoS failure detection mechanism for spatial multiplexing token protocol[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2011, 34(4): 28 - 33. (曹鹏, 黄国策, 景渊, 等. 空间复用令牌协议错误检测机制的QoS[J]. 北京邮电大学学报, 2011, 34(4): 28 - 33.)
- [4] ZHANG L, ZHANG N, ZHAO Y, *et al.* Study on optimum objective of topology control in multi-hop wireless network[J]. Journal on Communication, 2005, 26(3): 117 - 123. (张禄林, 张宁, 赵亚男, 等. 多跳无线网络拓扑控制优化目标研究[J]. 通信学报, 2005, 26(3): 117 - 123.)
- [5] ZHENG G, LIU S, QI X. Survey on topology of wireless sensor networks based on small world network model[J]. Control and Decision, 2010, 25(12): 1761 - 1768. (郑耿忠, 刘三阳, 齐小刚. 基于小世界网络模型的无线传感器网络拓扑研究综述[J]. 控制与决策, 2010, 25(12): 1761 - 1768.)
- [6] WANG L, PAN J. ANT-LEACH: LEACH routing protocol integrated energy optimization by ant colony optimization in wireless sensor network[J]. Journal of Computer Applications, 2011, 31(11): 2891 - 2894. (王林, 潘军. 无线传感器网络中基于能量优化的路由协议 ANT-LEACH[J]. 计算机应用, 2011, 31(11): 2891 - 2894.)
- [7] LIU H, YIN R, HAO X, *et al.* A robust adjustable topology algorithm with steady links in wireless sensor network[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2009, 31(11): 2751 - 2756. (刘浩然, 尹荣荣, 郝晓辰, 等. 无线传感器网络中一种具有稳定链路的鲁棒可调拓扑算法[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(11): 2751 - 2756.)
- [8] LEI M, LI D, CHEN J, *et al.* Research on self-organization reliability of wireless sensor network[J]. Complex System and Complexity Science, 2005, 2(2): 20 - 23. (雷鸣, 李德识, 陈建, 等. 无线传感器网络的自组织可靠性研究[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2005, 2(2): 20 - 23.)
- [9] FANG J, BI Q, LI Y, *et al.* A kind of complex dynamic network harmonious unified hybrid model and universal characteristics[J]. Science in China: Series G, 2007, 37(2): 230 - 249. (方锦清, 毕桥, 李永, 等. 复杂动态网络的一种和谐统一的混合择优模型及其普适特性[J]. 中国科学 G 辑, 2007, 37(2): 230 - 249.)
- [10] MILGRAM S. The small world problem [J]. Psychology Today, 1967, 1(1): 60 - 67.
- [11] WATTS D J, STROGATZ S H. Collective dynamics of "small-world" networks[J]. Nature, 1998, 339: 440 - 442.
- [12] ALBERT L B, REKA A. Emergence of scaling in random networks [J]. Science, 1999, 286: 509 - 512.
- [13] ZHENG D, TRIMPER S, ZHENG B, *et al.* Stochastic weight assignments[J]. Physical Review E, 2003, 67: 040102.
- [14] ANTAL P L, KRAPIVSKY P L. Weight-driven growing networks [J]. Physical Review E, 2005, 71: 026103.
- [15] BARRAT A, BARTHELEMY M, VESPIGNANI A A. Weighted evolving networks: Coupling topology and weight dynamics [J]. Physical Review Letters, 2004, 92(22): 228701.
- [16] WANG W X, WANG B, HU B, *et al.* A weighted complex network model driven by traffic flow [J]. Physical Review Letters, 2005, 94: 188702.
- [17] FANG J, LI Y. Advances in unified hybrid theoretical model of network science[J]. Advances in Mechanics, 2008, 38(6): 663 - 678. (方锦清, 李永. 网络科学中统一混合理论模型的若干研究进展[J]. 力学进展, 2008, 38(6): 663 - 678.)

(上接第 324 页)

- [2] AHMED A, SHI H, SHANG Y. Network-aware positioning in sensor networks[C]// Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems. Piscataway: IEEE, 2005: 267 - 274.
- [3] INGRAM S, HARMER D, QUINLAN M. Ultra-wideband indoor positioning systems and their use in emergencies[C]// Proceedings of the 2004 Position Location and Navigation Symposium. Piscataway: IEEE, 2004: 706 - 715.
- [4] KARIRA V, KATURI S. Application of a modified matrix pencil method for direction of arrival and time of arrival estimation[C]// Proceedings of the 2011 Annual IEEE India Conference. Piscataway: IEEE, 2011: 1 - 4.
- [5] NAVARRO M, NAJAR M. Frequency domain joint TOA and DOA estimation in IR-UWB [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(10): 1 - 11.
- [6] IRAHHAUTEN Z, NIKOOKAR H, KLEPPER M. 2 D UWB localization in indoor multipath environment using a joint TOA/DOA technique [C]// Proceedings of the 2012 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Piscataway: IEEE, 2012: 2253 - 2257.
- [7] VANDERVEEN M, PAPADIAS C, PAULRAJ A. Joint Angle and Delay Estimation (JADE) for multipath signals arriving at an antenna array[J]. IEEE Communications Letters, 1997, 1(1): 12 - 14.
- [8] VANDERVEEN M, VEEN A, PAULRAJ A. Estimation of multipath parameters in wireless communications [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1998, 46(3): 682 - 690.
- [9] GABER A, OMAR A. Joint time delay and DOA estimation using 2D matrix pencil algorithm and IEEE 802.11ac[C]// Proceedings of the 10th Workshop on Positioning Navigation and Communication. Piscataway: IEEE, 2013: 1 - 6.
- [10] HUA Y. Estimating two-dimensional frequencies by matrix enhancement and matrix pencil[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1992, 40(9): 2267 - 2280.
- [11] KHAN M, TUFAIL M. Comparative analysis of various matrix pencil methods for direction of arrival estimation [C]// Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Image Analysis and Signal Processing. Piscataway: IEEE, 2010: 496 - 501.
- [12] XU G, SILVERSTEIN S, ROY R. Beamspace ESPRIT[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1994, 42(2): 349 - 356.
- [13] ZOLTOWSKI M, HAARDT M, MATHEWS C. Closed-form 2D angle estimation with rectangular arrays in element space or beamspace via unitary ESPRIT[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1996, 44(2): 316 - 328.
- [14] PENG S, LIU Q, WANG G. A novel method for doa estimation of uncorrelated signal based on beamspace [J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(3): 450 - 453. (彭世蕤, 刘泉, 王广学. 一种基于波束空间的非相关信号源 DOA 估计方法[J]. 电子学报, 2007, 35(3): 450 - 453.)
- [15] GOLUB G, VAN LOAN C. Matrix computation [M]. Baltimore: Johns Hopkins University Press, 1996: 254.