

认知无线电中发射端多波束形成算法及接收端低旁瓣波束形成算法

王海¹ 原晓云¹ 卢爱红¹ 张星航¹ 孙久皓²

(1. 解放军理工大学通信工程学院, 南京, 210007; 2. 沈阳军区 65040 部队, 沈阳, 110000)

摘要: 在认知用户基站发射端, 针对多用户产生多波束使每个波束的主瓣方向对准目标信号而零陷对准干扰方向, 实现多用户同频通信从而提高频谱的利用率。而接收端需要波束形成算法具有抗干扰的能力, 因此, 本文提出了适用于授权用户基站接收端的低旁瓣波束形成算法, 在主用户面对干扰时, 其接收信号质量不会大幅下降。仿真实验验证了本文的算法。

关键词: 认知无线电; 波束形成; 多波束; 低旁瓣

中图分类号: TN95 **文献标志码:** A

Multi-Beam Transmit Beamforming and Low-Sidelobe Receive Beamforming Algorithm in Cognitive Radio

Wang Hai¹, Yuan Xiaoyun¹, Lu Aihong¹, Zhang Xinghang¹, Sun Jiuhao²

(1. College of Communications Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing, 210007, China; 2. Unit 65040 Shenyang Military Region, Shenyang, 110000, China)

Abstract: In CR networks, a transmitting and receiving beamforming algorithm is proposed. In transmitting beamforming, a multi-beam algorithm is proposed to send different signals to different secondary users. In receiving beamforming, a low side-lobe beamforming algorithm is presented. To avoid the interference when primary and secondary users share the same spectrum, the problem of transmitting beamforming is transformed into the one that can be solved by CVX toolbox. In receive beamforming, based on the method of array pattern optimization, a low side-lobe level receiving beamforming algorithm is proposed in primary base station to suppress the white noise and unexpected interference. Extensive numerical results using simulated wireless channels in two dimensions are presented to verify the effectiveness of the algorithm.

Key words: cognitive radio; beamforming; multi-beam; low-sidelobe

引言

认知无线电的波束成形技术能够抑制认知用户和主用户之间的干扰, 提高系统容量。接收端波束

形成算法^[1,2](也称作经典波束形成算法)经过几十年的发展已日趋成熟。接收机应用波束成形技术的主要目标是使波束主瓣方向对准目标信号,低旁瓣或者零陷对准干扰和噪声信号方向^[3,4]。在阵列天线中,当阵元接收窄带远场信号时,信号到达每个阵元的相位取决于阵元之间的距离和来波方向的波达角。在波束形成算法中,通常需要预先获得来波方向波达角。但是,当目标信号真实方向与估计方向出现偏差时,会造成性能急剧退化。经典的波束形成算法模型只适用于单目标用户接收方案。近年来很多学者开始关注多天线、多用户的发射端模型。适用于多用户的模型涉及到多个阵列权向量相互之间产生的干扰问题,当一个基站同时向两个移动终端传输信息时,会产生两个波束分别对准不同的目标信号。

认知无线电系统采用基于干扰温度频谱共享方式^[5],应用波束形成技术能够在保证授权用户通信质量的前提下,大大改善认知用户的传输性能,提高频谱利用效率。在认知用户网络中,认知基站应该尽量减小对授权用户的干扰,本文在认知用户发射端采用多波束发射波束形成技术,提出了针对多用户不同信息传输的发射端波束形成优化算法,通过多个阵列权向量分别产生多个波束对准不同的目标。本文还提出了一个低旁瓣的接收端波束形成算法,并将其应用于授权用户接收端,可降低噪声干扰功率,抑制未知干扰^[6-14]。

1 系统模型

图1是本文采用波束形成的系统收发模型,包括授权用户通信网络和认知用户通信网络。其中,SBS表示认知用户发射基站,PU表示授权用户。在认知用户网络中考虑 K 个认知用户,在其发射基站上装备 N 元天线阵列形成多波束。在授权用户网络中,考虑在授权用户基站上装备 M 元天线阵列来接收来自授权用户的信号,各个用户端只安装单个天线。

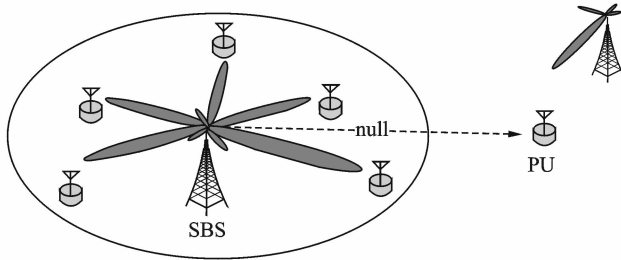


图1 采用波束形成的系统收发模型

Fig.1 Transmit and receive system model using beamforming

认知用户 $i, i \in \{1, 2, \dots, K\}$ 接收端信号为

$$y_i = \mathbf{h}_i^H \mathbf{w}_i s_i + \sum_{j \neq i}^K \mathbf{h}_j^H \mathbf{w}_j s_j + n_i \quad (1)$$

式中: $\mathbf{h}_i^H = [h_i(1), h_i(2), \dots, h_i(N)]$ 表示信道向量; $h_i(m)$ 表示信道向量的第 m 个参量, $m \in \{1, 2, \dots, N\}$; $\mathbf{w}_i = [\omega_1, \dots, \omega_N]^H$ 表示认知基站向第 i 个用户发射的阵列最优权向量; s_i 表示从基站到目标 i 的信号; K 为认知用户的个数; n_i 表示复高斯白噪声,方差为 $\delta_i^2, n_i \sim CN(0, \delta_i^2)$ 。

信道的表示模型为^[6]

$$h_i(m) = c l_i^{-(\alpha/2)} [g_n e^{j\beta} e^{j(2\pi/\lambda)[d(N-1)\sin(\theta_i^m)]}] \quad (2)$$

式中: $c l_i^{-(\alpha/2)}$ 为基站和用户 i 之间的衰落参数; α 为路径衰落指数; l_i 为基站和用户 i 之间的距离; c 为常量; g_n 为瑞利衰落因子; β 为相位偏差; d 为空间阵元之间的距离; θ_i^m 为阵元和信号之间的角度。

信道协方差矩阵可以表示为

$$\mathbf{R}_i = E(\mathbf{h}_i \mathbf{h}_i^H) \quad (3)$$

假设信号的平均能量归一化, 即 $E_s[|s_i|^2] = 1$, 则第 i 个认知用户接收到信号的信干噪比可以表示为

$$\text{SINR}_i = \frac{\mathbf{w}_i^H \mathbf{R}_i \mathbf{w}_i}{\sum_{j=1, j \neq i}^K \mathbf{w}_j^H \mathbf{R}_i \mathbf{w}_j + \delta_i^2} \quad 1 \leq i \leq K \quad (4)$$

2 发射端多波束形成算法

在认知用户网络中, 传统的下行波束形成算法将最小化发射功率作为目标函数, 将每一个认知用户的信干噪比作为限制条件, 其数学表述如下

$$\begin{aligned} & \min \sum_{m=1}^N \|\mathbf{w}_m\|^2 \\ \text{s. t. } & \frac{\mathbf{w}_i^H \mathbf{R}_i \mathbf{w}_i}{\sum_{j=1, j \neq i}^K \mathbf{w}_j^H \mathbf{R}_i \mathbf{w}_j + \delta_i^2} \geq \gamma_k \quad \forall i = 1, 2, \dots, K \end{aligned} \quad (5)$$

式中 γ_k 为认知用户 i 正常通信时所需的最小信干噪比。

但在本模型中, 由于授权用户所受到的干扰需小于一定的门限值, 因此增加一条约束条件

$$\sum_{i=1}^K \mathbf{w}_i^H \mathbf{R}_p \mathbf{w}_i \leq I \quad (6)$$

式中 \mathbf{R}_p 是认知发射基站和授权用户之间信道的协方差矩阵; I 为授权用户能够接受的干扰的最大值, 因此优化问题可以表述为

$$\begin{aligned} & \min \sum_{m=1}^N \|\mathbf{w}_m\|^2 \\ \text{s. t. } & \frac{\mathbf{w}_i^H \mathbf{R}_i \mathbf{w}_i}{\sum_{j=1, j \neq i}^K \mathbf{w}_j^H \mathbf{R}_i \mathbf{w}_j + \delta_i^2} \geq \gamma_k \quad \forall i = 1, 2, \dots, K \\ & \sum_{i=1}^K \mathbf{w}_i^H \mathbf{R}_p \mathbf{w}_i \leq I \end{aligned} \quad (7)$$

由于问题(7)是非凸问题, 因此难以利用凸优化工具进行求解。但是式(7)的特殊性使其能够进行转换从而更容易解决。可以采用半正定松弛方法。

定义矩阵 $\mathbf{W}_m = \mathbf{w}_m \mathbf{w}_m^H$, 则根据矩阵的迹的性质, 有 $\mathbf{w}_i^H \mathbf{R}_i \mathbf{w}_i = \text{Tr}(\mathbf{R}_i \mathbf{W}_i)$, 则问题(7)可以转化为

$$\begin{aligned} & \min \sum_{m=1}^N \text{Tr}(\mathbf{W}_m) \\ \text{s. t. } & \text{Tr}(\mathbf{R}_i \mathbf{W}_i) - \gamma_k \sum_{j=1, j \neq i}^K \text{Tr}(\mathbf{R}_i \mathbf{W}_j) \geq \gamma_k \delta_i^2 \\ & \sum_{i=1}^K \text{Tr}(\mathbf{R}_i \mathbf{W}_i) \leq I, \mathbf{W}_i \geq 0, \text{rank}(\mathbf{W}_i) = 1, i = 1, 2, \dots, K \end{aligned} \quad (8)$$

引进变量 P , 并进行约束条件松弛, 利用半正定松弛, 舍去 $\text{rank}(\mathbf{W}_i) = 1$ 的约束条件, 则问题(8)可以转化为如下的凸问题

$$\begin{aligned} & \min P \\ \text{s. t. } & \left(1 + \frac{1}{\gamma_k}\right) \text{Tr}(\mathbf{R}_i \mathbf{W}_i) - \sum_{j=1, j \neq i}^K \text{Tr}(\mathbf{R}_i \mathbf{W}_j) - \delta_i^2 \geq 0 \\ & I - \sum_{i=1}^K \text{Tr}(\mathbf{R}_i \mathbf{W}_i) \geq 0, P - \sum_{i=1}^K \text{Tr}(\mathbf{R}_i \mathbf{W}_i) \geq 0, \mathbf{W}_i \geq 0 \end{aligned} \quad (9)$$

3 接收端波束形成算法

在实际应用中,干扰信号的存在会导致授权用户的通信性能大幅下降,在阵列权向量的求解中,如果能降低波束的旁瓣,则能够确保授权用户的性能不会大幅下降。因此,针对授权用户网络基站接收问题,提出了低旁瓣的接收端波束形成算法。

2003年,J. Liu等给出了一种基于二阶锥规划(Second-order cone programming, SOCP)的方法^[7]对旁瓣进行约束,其公式如下

$$\begin{aligned} \min_w & \mathbf{w}^H \mathbf{R}_x \mathbf{w} \\ \text{s. t.} & |f(\theta_d)| = 1, |f(\phi_i)| \leq \epsilon \quad \phi_i \in \Phi \end{aligned} \quad (10)$$

式中:方向图函数 $f(\phi) = \mathbf{w}^H \mathbf{a}(\phi)$; θ_d 为目标信号角度; ϕ 为旁瓣的角度范围; ϵ 为目标峰值的旁瓣电平。问题(10)是凸优化问题。SOCP方法需预先设定旁瓣电平值 ϵ 。其值的不合理设置将会导致式(10)没有可行解。同时,该方法是基于采样矩阵 \mathbf{R}_x 的算法,当快拍数小或者方向匹配存在误差时,算法的性能将严重下降。为了解决这一问题,本文提出以下算法。

假设接收基站配备 M 个阵元的阵列天线,接收来自不同方向授权用户和认知用户的信号。在 t 时刻,接收信号 $\mathbf{x}(t)$ 为一个 $M \times 1$ 的向量,表示为

$$\mathbf{x}(t) = s_p(t) \mathbf{a}_p(\theta) + \sum_{j=1}^K s_j(t) \mathbf{a}_j(\theta) + \mathbf{v}(t) \quad (11)$$

式中:授权用户的方向向量为 $\mathbf{a}_p(\theta) = [1, e^{j2\pi d \sin(\theta)\lambda}, \dots, e^{j2\pi[M-1]d \sin(\theta)\lambda}]$, $s_p(t)$ 为来自授权用户方向的信号, $s_j(t)$ 表示认知用户方向 $\mathbf{a}_j(\theta)$ 的信号, $\mathbf{v}(t)$ 表示高斯白噪声。该接收信号通过阵列权向量后为

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{w}_p^H \mathbf{x}(t) \quad (12)$$

式中: \mathbf{w}_p 为 $M \times 1$ 的阵列最优权向量, $\mathbf{w}_p = [\omega_1, \dots, \omega_M]^H$ 相适应的方向图表示为

$$f(\theta) = \sum_{i=1}^N \omega_i e^{j2\pi d \sin(\theta)\lambda} = \mathbf{w}_p^H \mathbf{a}(\theta) \quad (13)$$

式中 $\omega_i \in [\omega_1, \dots, \omega_M]$ 。在本模型中,从阵列方向图角度考虑,要求阵列权向量满足以下条件:(1)主瓣方向指向授权用户方向以接受目标信号;(2)零陷方向指向认知用户方向以抑制干扰;(3)令主瓣宽度尽量窄,旁瓣尽量低从而抑制突发的干扰和噪声。为方便表述,定义一个方向函数^[8]

$$g(\phi) = \begin{cases} \sqrt{\frac{1}{\mathbf{a}^H(\phi) \mathbf{R}_x^{-1} \mathbf{a}(\phi)}} & \phi \in \Phi \\ \text{ming}(\phi) & \phi \in \bar{\Phi} \end{cases} \quad (14)$$

其中, $\bar{\Phi}$ 为 Φ 的补集,定义一个加权阵列方向图函数

$$q(\phi) = g(\phi) f(\phi) \quad (15)$$

当 $\phi \in \Phi$, $g(\phi)$ 为 Capon 谱表达式,在干扰角度有峰值,根据式(14,15)得到以下结论:

(1) $f(\phi)$ 的主瓣宽度和 $q(\phi)$ 相同, $g(\phi)$ 在主瓣区域内为常数。(2) 当降低 $q(\phi)$ 最高旁瓣电平时, $f(\phi)$ 在干扰角度上则出现零陷。(3) 由于 $g(\phi)$ 为一个小常数,因此 $g(\phi)$ 与 $f(\phi)$ 的主瓣均指向目标方向。(4) 当 $q(\phi)$ 的最高旁瓣电平为 ϵ 时, $f(\phi)$ 的峰值电平小于等于 ϵ 。

证明:对于 $\forall \phi \in \Phi$, 由于 $q(\phi)$ 的旁瓣电平为 ϵ , 有 $q(\phi)/q(\theta_d) \leq \epsilon$, $f(\phi)/f(\theta_d) = (q(\phi)/q(\theta_d)) * (g(\phi)/g(\theta_d))$ 。 $\forall \phi \in \Phi$, $g(\theta_d) \leq g(\phi)$, 则有 $f(\phi)/f(\theta_d) \leq q(\phi)/q(\theta_d) \leq \epsilon$ 。

综上所述,认知无线网络的波束形成算法转换为方向图 $q(\phi)$ 凸优化的问题。数学表达式如下,可用 CVX 算法求解。

$$\min_w \max |q(\phi)|$$

$$\text{s. t. } q(\theta_a) = 1 \quad (16)$$

4 仿真与分析

考虑一个均匀的 8 阵元阵列分别装配在认知用户发射端和授权用户接收端,阵元间距为半波长、噪声为独立的复高斯白噪声。认知无线网络设定为 1 个认知基站和 3 个认知用户。认知用户 1,2,3 分别从 $260^\circ, 23^\circ, 54^\circ$ 的角度入射,授权用户从 128° 方向入射,INR 为 30 dB,采样快拍数为 30。授权用户基站和各用户之间的角度关系:认知用户 1,2,3 分别从 $30^\circ, 125^\circ, 225^\circ$ 的角度入射,授权用户从 10° 方向入射,INR 为 30 dB,采样快拍数为 30。

4.1 发射端多波束形成

如图 2 所示,可以看出,发射基站针对 3 个认知用户产生了 3 个阵列权向量,每 1 组阵列权向量产生了相对应的波束。将权向量分别定义为 w_{s1}, w_{s2}, w_{s3} ,其中 w_{s1} 产生的波束形状主瓣对准认知用户 1 的方向,在认知用户 2 和认知用户 3 方向具有较小旁瓣; w_{s2} 产生的波束形状主瓣对准认知用户 2 的方向,在认知用户 1 和认知用户 3 方向具有较小旁瓣; w_{s3} 产生的波束形状主瓣对准认知用户 3 的方向,在认知用户 1 和认知用户 2 方向具有较小旁瓣。与此同时,三者的波瓣的零陷均对准授权用户的方向,因此大大减小了对授权用户造成的干扰。

从图 3 可以看出,认知用户发射基站发射功率随着授权用户对干扰要求的升高而升高。SINR 从 0 到 15 变化时,认知用户的发射功率从 0 到 22 dBW。其中,随着天线个数的增多,发射功率增大。当授权用户对干扰的要求为 10 dB,天线个数为 8 的情况比天线个数为 4 的情况发射功率增大 2 dBW,天线个数为 10 时比天线个数为 4 时,功率增大大约 8.2 dBW。

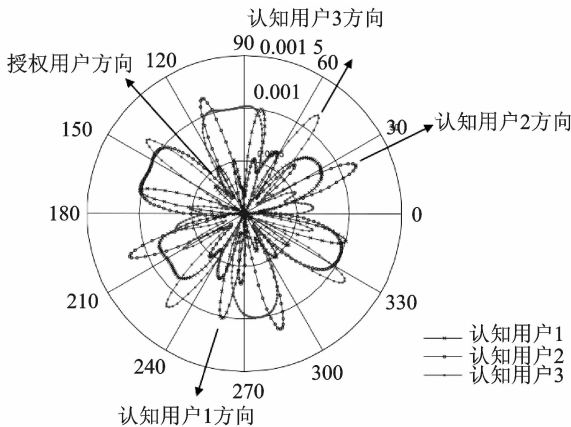


图 2 认知基站发射端全向多波束方向图

Fig. 2 Omnidirectional beam pattern on transmitting end of cognitive base station

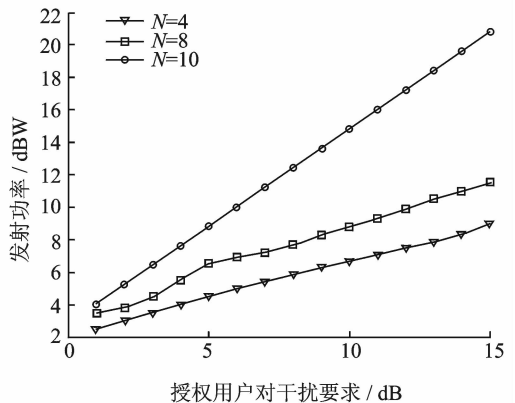


图 3 发射功率变化图

Fig. 3 Transmit power change figure

4.2 接收端低旁瓣波束形成

图 4 是一系列波束形成算法方向图。由图中可以得知,矩阵求逆方法 SMI 和对角加载法 LSMI 会产生较大的旁瓣,EIGNPACE 算法和 RECONSTRUCT 会产生较小的旁瓣。由于这些算法根据采样矩阵求出最优权向量,在此背景下通过全向波束观测是对称的,这会导致对称角度上无法控制波束来抑制干扰。在本文所提到的方向图综合方法中,由于阵列最优权向量通过方向图约束得到,可以从更广的角度来控制波束从而更有效地抑制干扰。

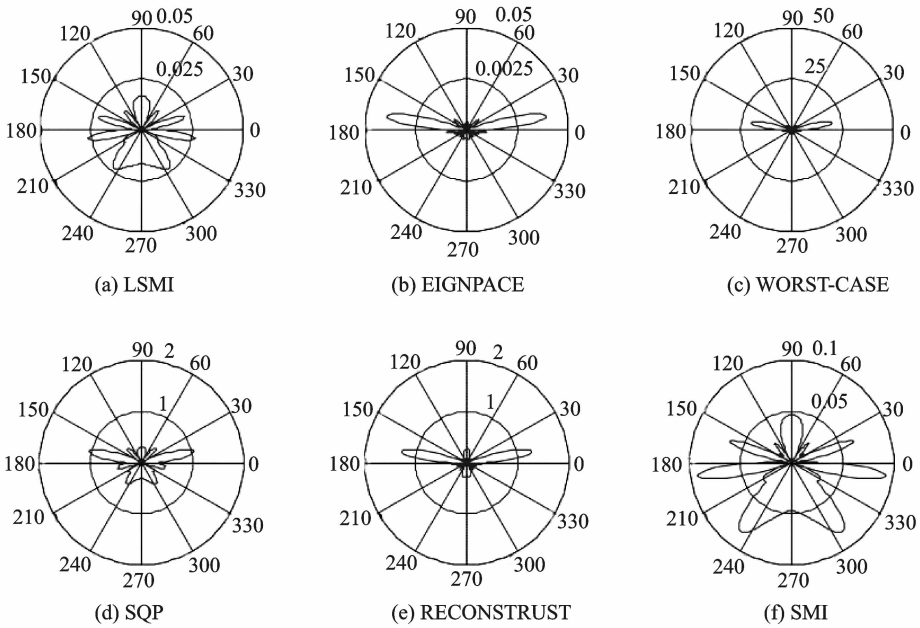


图4 不同波束形成算法的方向图
Fig. 4 Different beamforming algorithm pattern

图5将本节算法与文献[7]算法进行对比。在文献[7]中,需要预先设定一个旁瓣电平值。经过测试,在给定阵元的阵列和主瓣宽度下,旁瓣最高电平可达到-30 dBW,如果预先设定的旁瓣电平低于-30 dBW则无法求解。在本实验中,将式(10)中的旁瓣电平 $\epsilon = -30$ 。通过图5可以看出本节算法在主瓣方向与文献[7]算法形状一致,不同的是旁瓣在干扰方向的降低了约1.5 dB。

5 结束语

在认知无线网络中,分别针对发射端和接收端提出多波束的发射端波束形成算法和低旁瓣接收端波束形成算法。在发射端波束形成中,将约束条件松弛,从而把优化问题转换为凸优化工具便于求解的形式。所形成的多波束使不同波束的主瓣方向对准不同的期望信号,零陷对准授权用户方向,较低旁瓣对准其他干扰方向。而在授权用户网络通信中,接收基站形成低旁瓣的接收波束,从而更好地抑制未知的干扰和噪声。通过对阵列方向图的优化,使主瓣能够自适应地对准来波方向而零陷对准干扰方向,且旁瓣进一步降低。在仿真方面,两种算法均从全向进行观测。从仿真的结果来看,认知基站发射端的波束形成能够使主瓣对准认知用户方向,共同的零陷对准授权用户,授权基站接收端的波束形成旁瓣通过阵列方向图的优化得到了降低。

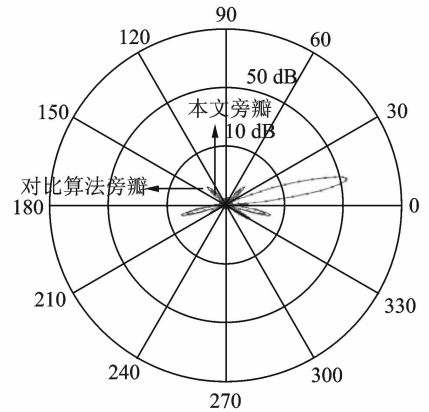


图5 授权用户接收端低旁瓣波束图
Fig. 5 Low sidelobe beam pattern of authorized users receive end

参考文献:

[1] Sidiropoulos N D, Davidson T N, Luo Z Q. Transmit beam forming for physical-layer multicasting[J]. IEEE Trans on Sig-

nal Processing, 2006, 54(6):2239-2251.

- [2] Beko M. Efficient beamforming in cognitive radio multicast transmission[J]. *IEEE Trans Wireless Commun*, 2012, 11(11): 4108-4117.
- [3] Phan A H, Tuan H D, Kha H H, et al. Nonsmooth optimization for efficient beamforming in cognitive radio multicast transmission[J]. *IEEE Trans Signal Process*, 2012, 60(6):2941-2951.
- [4] Schubert M, Boche H. Iterative multiuser uplink and downlink beamforming under SINR constraints[J]. *IEEE Transaction on Signal Processing*, 2005, 49(7):2324-2334.
- [5] Islam M H, Liang Y C, Hoang A T. Joint power control and beamforming for secondary spectrum sharing[C]// *Vehicular Technology Conference (VTC 2007)*. Baltimore, MD: IEEE, 2007:1548-1552.
- [6] Zarrebini-Esfahani A, Nakhai M R. Secondary spectrum access and cell-edge coverage in cognitive cellular networks[J]. *IET Communications*, 2012, 6(8):845-851.
- [7] Jing L, Gershman A B, Zhiqian L, et al. Adaptive beamforming with sidelobe control: A second-order cone programming approach[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2003, 10(11):331-334.
- [8] 阳凯. 阵列方向图综合与自适应波束形成技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2010.
Yang Kai. Research of array pattern forming integrated with adaptive beam[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2010.
- [9] Kang X, Zhang R, Liang Y C, et al. On outage capacity of secondary users in fading cognitive radio networks with primary user's outage constraint[C]// *Global Telecommunications Conference*. Honolulu, HI: IEEE, 2009:1-5.
- [10] Yu Y, Hua Y. Power allocation for a MIMO relay system with multiple-antenna users[J]. *IEEE Trans Signal Process*, 2010, 58(5):2823-2835.
- [11] Rashid-Farrokhi F, Tassiulas L, Ray Liu K J. Joint optimal power allocation and beamforming in wireless networks using antenna arrays[J]. *IEEE Transactions on Communication*, 1998, 46(10):1313-1324.
- [12] Krishna Gomadam, Viveck R Cadambe, Syed A Jafar. A distributed numerical approach to interference alignment and applications to wireless interference networks[J]. *IEEE Trans on Information Theory*, 2011, 57(6):3309-3322.
- [13] Chrisanthopoulou M P, Tsoukatos K P. Joint beamforming and power control for CDMA uplink throughput maximization [C]// *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 2007)*. Athens: [s. n.], 2007:1-5.
- [14] 叶中付, 徐东阳, 曹圣红, 等. 宽线性波束形成技术综述[J]. *数据采集与处理*, 2015, 29(3):333-340.
Ye Zhongfu, Xu Dongyang, Cao Shenghong, et al. Review for widely linear beamforming technique[J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2015, 29(3):333-340.

作者简介:



王海(1972-), 男, 教授, 研究方向: 无线网络传输, E-mail: haiwang@189.cn。

原晓云(1990-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 认知无线电波束成形。

卢爱红(1981), 女, 讲师, 研究方向: 星地混合链路波束成形。

