

# 用于 MIMO-OFDM 无线通信系统的一种 新的自适应半盲波束形成算法<sup>1</sup>

杜江 彭启琮 钟俊

(电子科技大学通信与信息工程学院 成都 610054)

**摘要:** 该文根据 MIMO-OFDM 物理层结构和无线移动矩阵信道的特性,从神经网络和信息论观点详细推导了一种新的多天线阵列自适应半盲波束形成器算法。与常规的盲估计和导频辅助信道估计算法不同的是,本文提出的新的半盲算法在权矢量自适应更新时,不断地用基于导频估计的权矢量进行修正。最后,用实际的 HIPERLAN2 协议进行了计算机仿真。结果表明这种算法不增加发射信号功率和不占用额外带宽,能提高天线增益性能和有效地提取出期望的发射信号,在收敛速度和 BER 性能方面优于常规的导频辅助信道估计算法。该波束形成器能自适应调整权矢量,其更新方式与 TDMA 和 CDMA 相似,所以本算法可直接用于有天线阵列的基于 OFDM 的第三代 (3G) 和三代后 (3G beyond) 的无线通信系统。

**关键词:** 矩阵信道, 自适应半盲算法, 神经网络, 波束形成器, MIMO-OFDM, 多天线阵列

**中图分类号:** TN929.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2004)06-0989-06

## A Novel Adaptive Semi-blind Beamforming Algorithm for MIMO-OFDM Wireless Communication Systems

Du Jiang Peng Qi-cong Zhong Jun

(Inst. of Comm. and Info. Eng., UEST of China, Chengdu 610054, China)

**Abstract** In this paper a novel adaptive semi-blind beamforming algorithm is proposed for OFDM-MIMO systems. First the nonlinear neural networks combined with maximized mutual information rule are used for estimating the coarse weights of beamformer, then the beamforming algorithm adaptively adjusts the vector weights by means of the known pilot tones inserted into the frame structure, thus the channel equalization can be further improved. The proposed algorithm is compared to two other channel estimators under various multipath fading environments through simulations and experimental data. The results show that the semi-blind beamforming algorithm has much better overall performance in terms of BER, moreover has high aperture gains with very good directivity in the beamformer pattern.

**Key words** Matrix channels, A daptive semi-blind algorithm, Neural network, beamformer, MIMO-OFDM, Multiple antenna arrays

### 1 引言

在第三代无线移动通信标准呼之欲出,第四代无线移动通信标准正处于广泛酝酿之际,人们注意到,为提高信道容量和传输速率以及通信质量,这两种标准都涉及到了基于 OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 调制的 MIMO (Multiple Input Multiple Output) 多天线阵列无线传输物理层体系结构这项关键技术<sup>[1]</sup>。OFDM 具有很好的抗多径衰落的特性;天线阵列的增益性能取决于阵列的空间几何分布的设计和分离接收信号的均衡权矢量的算法, MIMO 信道直接制约了无线通信的容量和质量,是通信网络规划和收发机设计必须考虑的重要因素,同时 MIMO 天线阵列还是空分多址 (SDMA) 的核心构架,所以,近年来对基于 OFDM 传输方案的 MIMO 信道的研究十分活跃<sup>[2]</sup>。目前,对 MIMO 无线信道的研究主要有两大方

<sup>1</sup> 2002-12-15 收到, 2003-09-22 改回

向, 第一是建立概念性实验平台, 通过对无线通信的多天线阵列实测数据的分析, 研究不同的视距 (Line Of Sight, LOS) 和非视距 (Non Line Of Sight, NLOS) 无线移动通信环境下的阵列信道特征及其对通信容量的影响; 第二是基于智能天线的波束形成器研究, 其中矩阵信道估计和均衡盲算法正成为研究热点, 即仅利用接收的阵列信号和源信号的先验统计特性估计矩阵信道进而恢复出发射信号, 矩阵信道的盲算法大多为基于子空间分解和 Bussgang 统计量的全盲算法 (常简称为盲算法)。但是, 这两种典型的盲算法都存在计算量大, 难以自适应无线移动信道的时变变化、收敛速度慢和符号差错率 (SER) 性能到一定程度不随 SNR 的提高而相应改善等缺点<sup>[3,4]</sup>。由于在 OFDM 的帧结构中有一定数量的收发端已知的前置信号 (preamble signal) 和导频信号, 因此, 本文结合已知的导频训练序列, 提出了一种新的用于多载波 (OFDM) 多天线阵列 (MIMO) 的自适应半盲算法。

## 2 MIMO-OFDM 系统模型

在无线通信中, 影响通信性能的一个重要因素是由信道色散产生的延迟扩展和 Doppler 扩展所导致的频率选择性衰落和时间选择性衰落; 在多天线系统中, 信道色散还产生角度扩展 (angular spread), 导致天线增益性能下降。传统的单载波和多载波传输系统, 在接收机用昂贵的均衡器和陡截的滤波器消除 ISI (Inter-Symbol Interference) 和进行信道的均衡, 并且都要用到训练序列。OFDM 以较低的速率把数据调制到多个正交的子载波上, 这种调制在发端利用 IFFT 把频域载波信号转换成时域复基带信号; 在收端执行 FFT 后, 对每个接收数据采样值仅须简单的复数乘法运算, 就可实现信道补偿, 恢复出原载波信号。由于把 OFDM 数据样本的最后一定数量的样本循环复制到同一数据块的最前端, 构成发射数据帧, 该帧信号与信道冲激响应的卷积成为圆周卷积。如果信道延迟扩展比循环前缀长度短, 就可以完全避免 ISI, 从而省去了陡截的滤波器和需大量复数乘加的均衡器, 使系统实现效率更高, 更具明显优势<sup>[5,6]</sup>。

将 OFDM 信号调制方式与  $M$  个发射天线  $N$  个接收天线构成的多天线 MIMO 系统结合起来, 就形成了 MIMO-OFDM 系统结构。在发射机, 二进制数据流经 OFDM 调制后, 由发射天线发射。在接收机, 接收的信号经 OFDM 解调后, 由波束形成器分离并估计出原发射信号。

## 3 自适应半盲波束形成算法

为了叙述方便, 本文公式的符号约定为黑体大写字母代表矩阵, 黑体小写字母代表矢量, 上标 T 为矩阵转置, H 为共轭转置。

设 MIMO 系统有  $M$  个发射天线阵列,  $N$  个接收阵列,  $N \geq M$ , 得到下标  $i$  表示第  $i$  个接收或发射天线。在一个 OFDM 符号周期内, 接收信号经 OFDM 解调后的信号  $\mathbf{X}(n)$  在  $n$  时刻可表示为

$$\mathbf{X}(n) = \mathbf{H}(\theta)\mathbf{S}(n) + \mathbf{V}(n) \quad (1)$$

其中  $\mathbf{X}(n) = [x_1(n) \ x_2(n) \ \cdots \ x_N(n)]^T$ ,  $x_i(n) = [x_{i,1}(n) \ x_{i,2}(n) \ \cdots \ x_{i,64}(n)]^T$  为第  $i$  个天线接收的一帧共 64 个子载波传输的有效数据; 发射信号  $\mathbf{S}(n) = [s_1(n) \ s_2(n) \ \cdots \ s_M(n)]^T$ ,  $s_i(n) = [s_{i,1}(n) \ s_{i,2}(n) \ \cdots \ s_{i,64}(n)]^T$  为第  $i$  个天线的发射信号; 加性白高斯噪声 (AWGN) 表示为  $\mathbf{V}(n) = [v_1(n) \ v_2(n) \ \cdots \ v_N(n)]^T$ ,  $v_i(n) = [v_{i,1}(n) \ v_{i,2}(n) \ \cdots \ v_{i,64}(n)]^T$ ;  $\mathbf{H}(\theta)$  为矩阵信道,  $\theta$  为天线孔径角度。

盲波束形成算法是仅利用接收信号  $\mathbf{X}(n)$ , 设计一个权矢量为  $\mathbf{w}_m(n)$  的波束形成器对该接收信号进行处理, 得到第  $m$  个用户发射的信号  $\tilde{s}_m(n)$ , 即

$$\tilde{s}_m(n) = \mathbf{w}_m(n)^H \mathbf{x}(n) \quad (2)$$

其中  $\tilde{s}_m(n) = [s_{m,1}(n) \ s_{m,2}(n) \ \cdots \ s_{m,N}(n)]^T$ ,  $\mathbf{w}_m(n) = [w_{m,1}(n) \ w_{m,2}(n) \ \cdots \ w_{m,N}(n)]^T$ ,  $m = 1, 2, \cdots, M$ 。对  $\tilde{s}_m(n)$  进行 FFT 变换, 得到相应的频域 OFDM 子载波的 16QAM 调制

符号  $\tilde{S}_m(n)$ , 且

$$\tilde{S}_m(n) = [\tilde{S}_{m,1}(n) \ \tilde{S}_{m,2}(n) \ \cdots \ \tilde{S}_{m,64}(n)]^T = \tilde{S}_m(n)F(n) = w_m(n)^H x(n)F(n) \quad (3)$$

其中  $F(n)$  表示 FFT 运算矩阵。然后, 对  $\tilde{S}_m(n)$  进行解调, 恢复出发射的源信号。

### 3.1 基于导频的自适应算法

为了适应时变的矩阵信道, 必须自适应调整波束形成器的权矢量  $w_m(n)$ 。这里, 我们先考虑利用每一帧 OFDM 符号内的导频信号。在频域将发射的导频  $s_m(n)$  作为训练序列,  $w_m(n)$  作为滤波器系数, 与接收到的  $K$  个导频信号  $\tilde{s}_m(n)$  一起, 根据 MMSE(最小均方误差) 准则构成自适应波束形成器的有关权矢量代价函数<sup>[4]</sup>:

$$J(n) = \sum_{i=1}^K E[|w_m(n)^H \tilde{s}_m(n) - s_{m,i}(n)|^2] \quad (4)$$

对上式的  $w_m(n)$  求导, 得到梯度函数:

$$\nabla J(n) = \sum_{i=1}^K [2R_{m,i}(n)w_m(n) - 2p_{m,i}(n)] \quad (5)$$

其中  $R_{m,i}(n) = E[\tilde{s}_{m,i}(n)\tilde{s}_{m,i}(n)^H]$  是第  $n$  帧 OFDM 符号内的第  $i$  个接收的导频信号的空间相关矩阵;  $p_{m,i}(n) = E[\tilde{s}_{m,i}(n)s_{m,i}(n)]$  是第  $i$  个训练导频信号矢量和第  $i$  个接收的导频信号矢量之间的互相关。

对式 (5) 用最陡下降法可得到权矢量的更新方程:

$$w_m(n+1) = w_m(n) - \frac{1}{2}\mu\nabla J(n) = w_m(n) - \mu \sum_{i=1}^K [2R_{m,i}(n)w_m(n) - 2p_{m,i}(n)] \quad (6)$$

由于集平均是一个随机统计量, 需要对大量的数据进行统计分析才能得到, 在计算上很不方便并且存在工程上不能接受的时间延迟, 所以往往用时间平均代替集平均, 使得  $R_{m,i}(n) = \tilde{s}_{m,i}(n)\tilde{s}_{m,i}(n)^H$  和  $p_{m,i}(n) = \tilde{s}_{m,i}(n)s_{m,i}(n)$ , 将该时间平均代入式 (6), 得到波束形成器的权矢量自适应更新方程:

$$w_m(n+1) = w_m(n) - \mu \sum_{i=1}^K [\tilde{s}_{m,i}(n)e_{m,i}^*(n)]$$

$$e_{m,i}^*(n) = w_m^H(n)\tilde{s}_{m,i} - s_{m,i} \quad (7)$$

### 3.2 在无训练序列的信息信号周期的自适应盲算法

由于在每帧 OFDM 信号周期内导频符号很少, 在 HIPERLAN2 无线网络结构中, 每帧仅有 4 个导频信号, 加之无线移动信道是随时间不断变化的时变信道并具有非线性特点<sup>[7]</sup>, 所以每隔一定时间用导频估计的波束形成器的权矢量很不准确, 需要利用其他信息来修正。

传统的 MIMO 信道盲估计一般采用 Bussgang 盲算法<sup>[3]</sup>, 但是, Bussgang 盲算法含有高阶统计量, 在一维信道估计存在收敛速度慢和所需样本数据过多的缺点, 所以, 这种算法在多信道估计和均衡方面不能得到推广和应用。

这里, 我们不是直接求解 MIMO 信道矩阵, 而是用无训练序列的信息信号的统计特性, 在信息信号时间内用神经网络表示信道矩阵的行向量的非线性关系, 用最大信息量准则来训练

神经网络的权值进而自适应地分离出原发射信号。唯一的假设条件是源信号是统计独立同分布的，这在 MIMO-OFDM 系统中很容易满足。

MIMO 神经网络的输出  $\mathbf{y}(n) = [y_{1,d}(n) \ y_{2,d}(n) \ \cdots \ y_{N,d}(n)]^T$ ,  $d = \{1, 2, \dots, 52\}$  为信息信号个数。在 OFDM 符号中的位置的表达式为

$$\mathbf{y}(n) = \mathbf{g}(\mathbf{u}), \quad \mathbf{u}(n) = \mathbf{W}\mathbf{x}(n) + \mathbf{w}_0(n) \quad (8)$$

其中  $\mathbf{g}(\cdot)$  表示神经网络的激活函数。

我们提出的自适应盲算法的最优化准则为确定神经网络参数  $(\mathbf{W}, \mathbf{w}_0)$  使得  $Y$  和  $X$  之间的互信息量  $I(Y, X)$  最大，即：

$$\max I(Y, X) = H(Y) - H(Y|X) \quad (9)$$

其中  $H(Y) = -\sum f_Y(\mathbf{y}) \log f_Y(\mathbf{y}) = -E[\log f_Y(\mathbf{y})]$  是  $Y$  的熵 (entropy)。由于  $Y$  与  $X$  之间总存在一个确定性系统，所以  $H(Y|X) = 0$ 。这样最优化准则简化为确定神经网络参数  $(\mathbf{W}, \mathbf{w}_0)$  使  $H(Y)$  最大。

由式 (8) 可以求得  $Y$  的概率密度函数为

$$f_Y(\mathbf{y}) = f_X(\mathbf{x})/|J| \quad (10)$$

$|J|$  是 Jacobi 矩阵的绝对值。将式 (10) 代入到式 (9)，得到：

$$H(Y) = -E[\log f_Y(\mathbf{y})] = E[\log|J|] - E[\log f_X(\mathbf{x})] = E[\log|J|] + H(X) \quad (11)$$

因为  $H(X)$  与参数  $(\mathbf{W}, \mathbf{w}_0)$  无关，对式 (11) 求导数，并用时间平均代替集平均，可进一步推导出：

$$\left. \begin{aligned} \nabla \mathbf{W} &= (\partial/\partial \mathbf{W}) E[\log|J|] = \mathbf{W}^{-H} + (\mathbf{I} - 2\mathbf{y})\mathbf{x}^H \\ \nabla \mathbf{w}_0 &= (\partial/\partial \mathbf{w}_0) E[\log|J|] = \mathbf{I} - 2\mathbf{y} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

利用最陡下降法，就得到了  $n$  时刻的自适应更新方程：

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{W}^{(n+1)} &= \mathbf{W}^{(k)} + \mu \nabla \mathbf{W}^{(n)} \\ \mathbf{w}_0^{(n+1)} &= \mathbf{w}_0^{(k)} + \mu \nabla \mathbf{w}_0^{(n)} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

这就是在无训练序列的信息信号周期内，MIMO 矩阵信道的波束形成器自适应盲识别方程。综合式 (7) 和式 (13) 构成一个完整的自适应半盲波束形成器的权系数更新算法。该更新方程形式上与熟知的 LMS 相同，因此具有与 LMS 相似的收敛特性<sup>[3,4]</sup>。

#### 4 仿真结果与分析

我们用实际的 LOS(对应于室内和阴影平坦衰落环境) 和 NLOS(对应于多径快衰落环境) 衰落信道对本文提出的算法进行仿真分析，并且与导频辅助信道估计算法 (Pilot Symbol Assisted channel estimator, PSA 算法) 进行性能对比。PSA 算法是利用在频域估计出导频对应的信道衰减，在时频域进行二维内插从而估计整个信道特性的一种方法。无线移动信道参数设置与 COST 207 通信标准一致，本文选用了两种典型的信道模型，见表 1。OFDM 帧结构采用 HIPERLAN 2 协议，每个 FFT 块由 64 个 16-QAM 星座组成，导频数为 4，初始信道估计的前置信号为 192 个训练符号；取样率为 20 MHz，符号间隔时间为  $4 \mu\text{s}$ ，数据加载速率为 24 Mbps，未进

表 1 HIPRLAN2 信道模型

| 信道 | 最大时延扩展 (ns) | 特性       | 通信环境 |
|----|-------------|----------|------|
| A  | 50          | Rayleigh | LOS  |
| B  | 100         | Rayleigh | NLOS |

行前向差错编码 (FEC)。实验数据为每帧 23 个 OFDM 符号, 共有 200 帧。天线阵列为 4 发射天线 4 接收天线的线性均匀分布阵列, 相邻阵元间距为半波长。

对本文的半盲算法 200 次 Monte Carlo 实验得到的权矢量进行平均, 用该均值恢复原信号, 将 5 次迭代得到的误比特率 (BER) 与 PSA 算法以及直接的无均衡得到的误比特率进行对比。图 1(a) 是在信道 A、移动速度产生的最大 Doppler 频移  $f_D = 5 \text{ Hz}$  时所进行的算法对比, 图 1(b) 是在信道 B 且移动速度产生的最大 Doppler 频移  $f_D = 50 \text{ Hz}$  时所进行的算法对比。由图可见在相同的 SNR, 本文的半盲算法得到的波束形成器能很好地对矩阵信道进行自适应均衡, 使得误比特率 BER 最小, 性能最好。

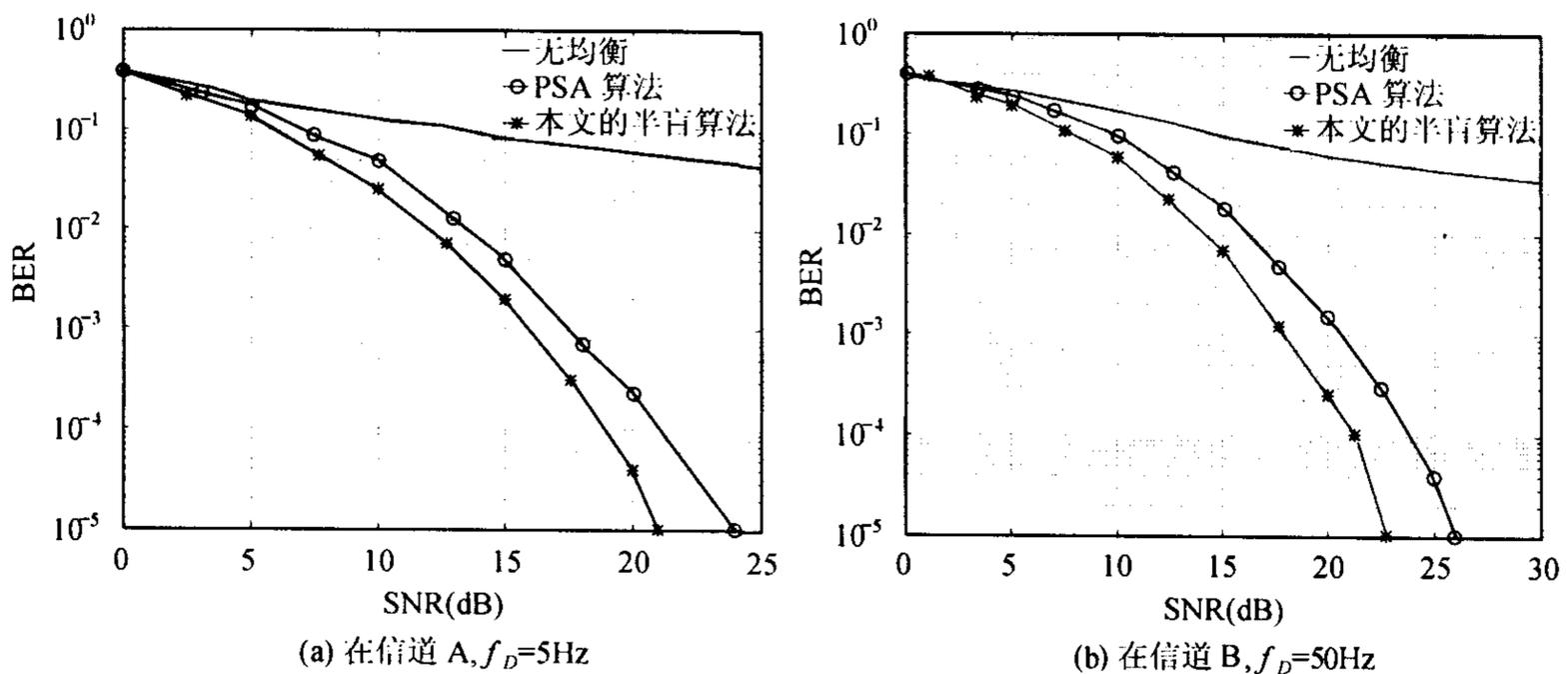


图 1 不同信道条件下算法性能比较

图 2 是在信道 A, 信噪比 SNR=14 dB 环境下, 当移动速度发生变化时本文提出的算法与 PSA 算法对信号分离和检测的性能曲线。由图可见随着移动速度的增加, 即最大 Doppler 频移增大, 平均 BER 下降, 但本文的半盲算法 BER 下降幅度比较平稳, 并且总的 BER 最小。

图 3 显示了本文的半盲波束形成器在任一时刻的波束图。由图可见有 4 个显著的天线增益峰值, 表明这种算法能分离出这 4 个源信号, 并且在 4 个 DOA(来波方向) 上得到的接收信号的功率的平均值最大, 同时也说明了这种波束形成器有很好的方向性。

### 5 结论

本文提出了一种新的用于 MIMO-OFDM 多天线阵列无线移动通信系统的半盲自适应波束形成算法。计算机仿真结果表明, 该算法在两种常用的频率选择性衰落信道中, 在 BER 方面明显优于现有的常规的 PSA 算法, 这对于天线阵列体系结构的矩阵信道的盲算法研究和应用开辟了一条新的途径。此外, 这种算法充分利用了 OFDM 的导频特性, 波束形成器能自适应调整权矢量, 其更新方式与 TDMA 和 CDMA 相似, 所以本算法可直接用于有天线阵列基于 OFDM 的第三代和以后的无线通信系统, 在多天线通信系统的矩阵信道估计和提高天线增益方面有广泛的应用前景。

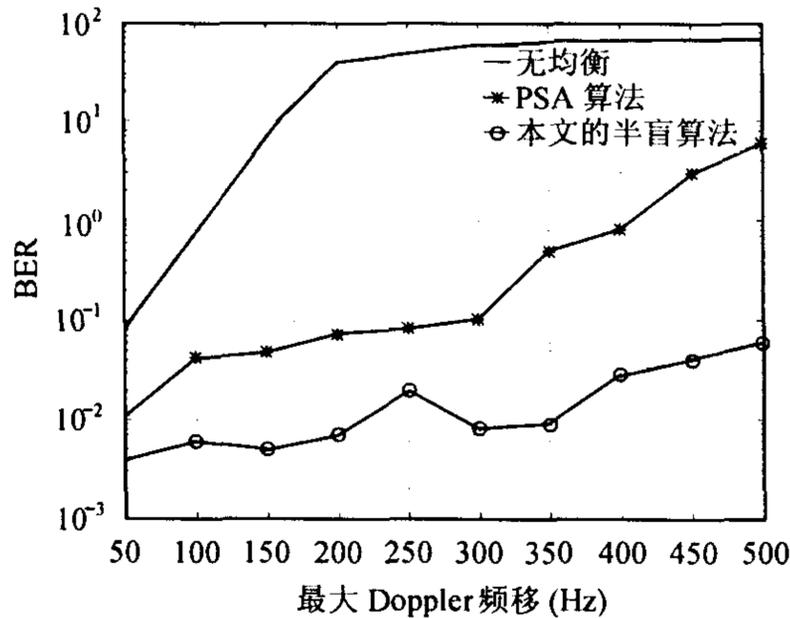


图 2 在信道 A 信噪比 SNR=14 dB 时, 本文的半盲波束形成算法与常规的 PSA 算法的性能比较

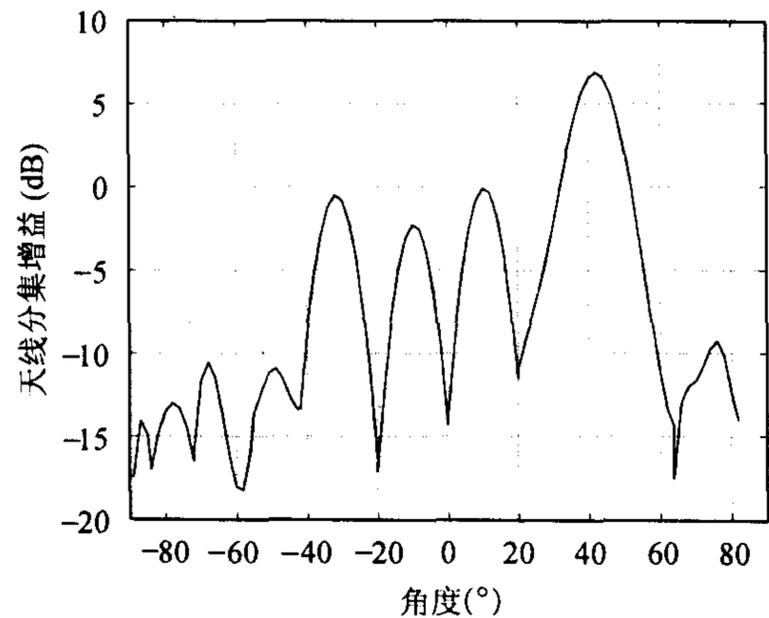


图 3 本文提出的半盲算法的波束形成器的波束图

### 参 考 文 献

- [1] Hanzo L, Webb W, Keller T. Single- and Multi-Carrier Quadrature Amplitude Modulation. West Sussex, England. John Wiley Sons Ltd, 2000: 321-345.
- [2] Tsoulos G V. Smart antennas for mobile communication systems: Benefits and challenges. *Electronics & Communication Engineering Journal*, 1999, 11(2): 113-116.
- [3] Haykin S. Adaptive Filter Theory, fourth edition. Englewood Cliffs, New Jersey, USA, Pearson Education Inc., 2002: 232-243.
- [4] Le Minh Tuan, Jaedon Park. A semi-blind LMS adaptive beamforming algorithm for smart antenna in an OFDM system. *IEEE Antennas and Propagation International Symposium*, San Antonio, Texas, USA, 2002, Vol.1: 618-621.
- [5] Bingham J A C. Multicarrier modulation for data transmission: An idea whose time has come. *IEEE Commun. Mag.*, 1990, 28(5): 5-14.
- [6] Wu Y, Zou W Y. Orthogonal frequency division multiplexing: a multicarrier modulation scheme. *IEEE Trans. on Consumer Elect.*, 1995, 41(3): 392-399.
- [7] Muquet B, de Courville M. Blind and semi-blind channel identification methods using second order statistics for OFDM systems. *Proc. ICASSP*, Phoenix, Arizona, USA, 1999, vol.5: 2745-2748.

杜 江: 男, 1969 年生, 博士生, 目前的研究方向为空时多载波的移动无线通信系统, 发表论文 10 余篇.

彭启琮: 男, 1946 年生, 通信与信息工程学院院长, 教授, 博士生导师, 主要从事实时信号处理和通信信号处理和宽带无线通信技术的研究.

钟 俊: 男, 1972 年生, 博士生, 研究领域为通信中的信号处理、DSP 系统设计.