

文章编号: 1672-2892(2012)05-0598-06

## 基于多天线接收的空间分集盲均衡算法

薛 江, 彭 华, 马金全

(解放军信息工程大学 信息工程学院, 河南 郑州 450002)

**摘 要:** 基于多天线接收的空间分集技术与均衡技术相结合的空间分集均衡算法可以克服衰落带来的不利影响, 有效提高通信系统接收端的性能。文中将多天线支路间的合并权值和均衡器的权值统一合并于盲均衡算法中的系数估计, 形成一种新的空间分集盲均衡算法, 该算法具有较小的实现复杂度和很好的均衡效果。通过仿真实验表明, 在误符号率相同的条件下, 本文提出的分集均衡算法比单路信号盲均衡算法所需信噪比低 1 dB~2 dB。同时分析了多天线接收的支路信号间存在的相位差以及延迟对算法的性能影响。

**关键词:** 盲均衡; 多天线; 空间分集; 分集合并

**中图分类号:** TN911.7

**文献标识码:** A

## Spatial diversity blind equalization algorithm based on multi-antenna receiving

XUE Jiang, PENG Hua, MA Jin-quan

(Institute of Information Engineering, Information Engineering University of P. L. A., Zhengzhou Henan 450002, China)

**Abstract:** The spatial diversity equalization algorithm based on multi-antenna receiving and equalization technology can suppress the fading effects and improve the receiver performance of the communication system. A novel spatial diversity blind equalization algorithm with lower implementation complexity and better equalization performance was proposed. The algorithm combined the weights of receiver-branches and equalizer into the blind equalization algorithm simultaneously. Simulation results showed that the proposed algorithm performed better than single channel equalization algorithm. And the influence of phase difference and time delay on the performance of the proposed algorithm were analyzed for the receiver-branches by simulation.

**Key words:** blind equalization; multi-antenna; spatial diversity; diversity combining

现代通信系统中, 由于多径衰落和信道失真引起的码间干扰(Inter Symbol Interference, ISI)造成传输信号发生畸变、接收信号误码率增大等问题, 严重影响了通信质量。均衡技术是克服码间干扰、提高接收系统性能的有效手段<sup>[1]</sup>。

为了提高接收系统的性能, 必须解决抗信道衰落的问题。分集技术是最为有效的抗衰落技术, 其基本思想是在接收端利用接收到的多个携带相同信息的发射信号样本, 它们经过衰落信道后在统计特性上具有较小的相关性, 可近似认为是相互独立的, 使用合理的方法合成这些信号后就可以获得几乎不受快衰落影响的合成接收信号。在现实非合作盲接收中, 基于多天线接收的空间分集易于实现, 应用程度较高, 节约频带资源, 最易满足独立性。

将空间分集与均衡技术相结合的空间分集均衡算法可以克服衰落带来的不利影响, 有效提高通信系统接收端的性能。过去十几年来, 许多文献都对基于多天线接收的空间分集技术与均衡技术的结合处理进行了分析与研究。Monsen<sup>[2]</sup>最早提出了空间分集的概念和结构。文献[3]提出了建立在多接收机或过采样条件下基于循环二阶统计量的盲均衡算法, 此类算法对信道阶数估计及子信道的互质性具有严格的要求<sup>[4]</sup>。文献[5]提出了基于盲自适应滤波算法的多维匹配滤波判决反馈 SIMO(Single Input Multiple Output)盲均衡算法, 文献[6]进一步研究了多维匹配滤波器与最大似然序列检测器结合的 SIMO 盲均衡算法, 这 2 种算法的原理是在多维匹配滤波器后级联 1 个判决反馈结构或最大似然检测器, 此类算法的难点主要集中在匹配滤波器系数的估计。文献[7]研究了联合盲均衡算

法与判决反馈结构的空间分集判决反馈盲均衡算法,此算法的实质与文献[5-6]算法是一致的,主要的不同是将文献[5-6]中的匹配滤波器设计为基于小波变换的盲均衡算法。由于实际中多天线接收的支路信号间都存在延迟和相位差,以上算法的应用前提都是支路信号间的相位同步与时间同步,并没有讨论支路信号间的延迟和相位差对其算法的影响。因此,在实际应用中同步问题增大了此类算法的实现难点和复杂度。

文献[8]提出了基于自适应滤波算法的合并均衡器,该算法不需要在分集合并前的同步处理,进一步简化了空间分集均衡器的结构,降低分集均衡处理的难度。但是该算法是一种需要训练序列的均衡算法,并且文献[8]并没有对支路信号间同步要求进行具体分析。对于非合作接收环境,训练序列难以得到,基于多天线接收的空间分集盲均衡算法可以实现以多天线协同接收形式对恶劣信道条件下通信信号的非合作接收,提高该条件下通信信号的接收性能和处理效果。本文将盲均衡算法应用于文献[8]提出的合并均衡器形成一种空间分集盲均衡算法。

## 1 分集合并技术

分集有两重含义:一是分散,即如何获得“独立”衰落的分集支路,主要分为空间分集、频率分集、角度分集、时间分集、极化分集等,这几种分集在独立情况下完全等效,在现实非合作盲接收中,空间分集易于实现,应用程度较高,节约频带资源,最易满足独立性;二是合并,即如何把接收的多个统计独立的衰落信号进行适当合并,从而降低衰落影响,改善系统性能,常用的方法有门限合并(Threshold Combining, ThC)、选择合并(Selection Diversity Combining, SDC)、最大比合并(Maximum Ratio Combining, MRC)、等增益合并(Equal Gain Combining, EGC),其中,在平坦衰落信道条件下, MRC 是一种最优的合并方式。

分集合并技术最主要 2 个优点是提高信噪比及克服信道衰落。

### a) 提高信噪比

分集合并在高斯白噪声条件下,具有提高信噪比、降低误码率的作用,如图 1 所示(BPSK 信号,高斯白噪声信道,  $R$  表示合并路数)。因此在低信噪比环境中,可以通过增大分集度来提高信号信噪比,达到接收解调处理的门限,从而提高接收系统的处理效果。

### b) 抗衰落性能

分集合并技术具有很好的抗衰落作用,可以充分利用多径传播信号以减小信道衰落的影响。假设某信道发生深度衰落的概率为  $p$ ,则对于  $N$  个独立支路而言,同一时刻同时发生深衰的概率为  $p^N$ 。对于分集合并技术,只要有 1 路信号未发生深衰,算法就可以保证很好的效果,即对于该信道而言能够实现有效传输的概率为  $1-p^N$ ,相对单路信号而言,提高了克服信道深衰的能力。

在平坦衰落信道条件下, MRC 是一种最优的合并方式。但是,在色散信道条件下,由于信道畸变产生的 ISI 存在, MRC 并不是一种最优的合并方式。

在 MRC 准则中,各支路信号在合并前要进行合并权值计算同步处理(包括符号同步和相位同步),如图 2 所示。其中  $a_1, \dots, a_N$  表示分集接收各个分路的衰减系数。

MRC 的复杂性主要体现在同步与权值计算:

a) (同步处理)符号同步与相位同步是支路信号合并的前提条件,否则将不会有合并效果。如 RAKE 接收机中也需要同步处理模块。因此需要对各支路进行相位估计,完成同步处理,增大了分集合并的复杂度。

b) (权重计算)权值合成公式如下:

$$a_i = \frac{R_{iSN}}{\sum_{i=1}^N R_{iSN}} \quad (1)$$

MRC 权值计算可以通过一些信噪比估计算法,或者其他一些基于子空间的直接权值估计算法,但是权值估计过程大大增加了分集合并的复杂度。

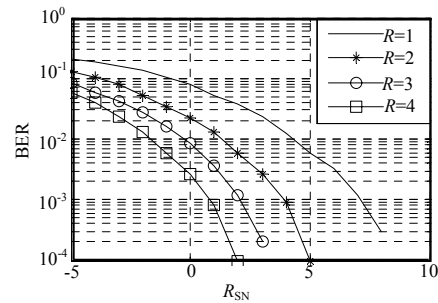


Fig.1 Diversity combining performance on AWGN channels  
图1 高斯白噪声条件下分集合并的性能

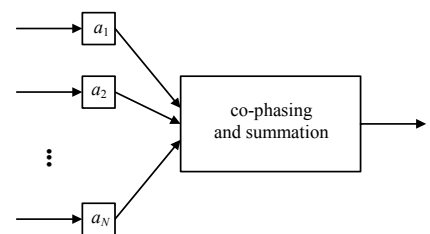


Fig.2 Diversity combining principle  
图2 分集合并原理

## 2 分集合并与均衡技术

在色散信道条件下, MRC 本身并不能克服 ISI, 并不能得到最优的抗衰落效果<sup>[9]</sup>。通过分集技术与均衡技术的结合, 可以克服色散信道带来的不利影响, 有效提高通信系统接收端的性能。

分集与均衡可以先对各支路进行均衡, 然后再级联合并处理模块(图 3(a)所示), 也可以先将支路信号进行合并然后再级联 1 个均衡器进行均衡处理(图 3(b)所示), 其中权值  $a_i$  的估计依据前面所提到的合并准则。2 种方式都能同时克服衰落的影响及降低码间干扰, 但是 2 种方法在支路信号进行合并前都要预先进行同步处理。

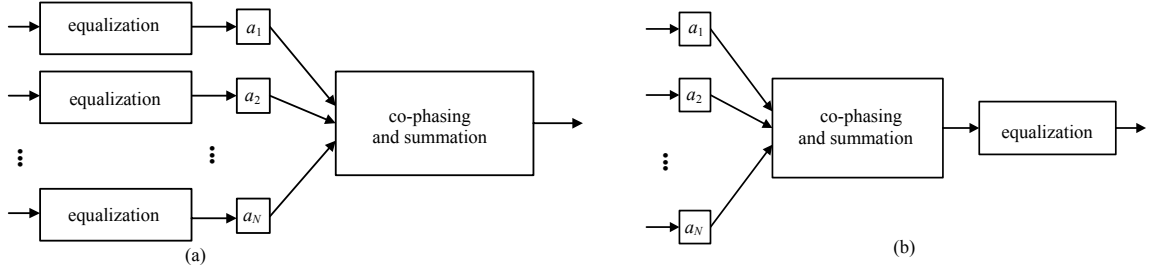


Fig.3 Cascade connection structure of diversity combining and equalization  
图 3 分集合并与均衡的级联结构

文献[8]提出一种合并均衡器, 均衡与合并不是单纯的级联关系, 如图 4 所示。权值调整可以使用 LMS(Least Mean Squares)和 RLS(Recursive Least Squares)算法, 由于该合并均衡器不需要同步处理, 大大减少了分集均衡处理的复杂度。

## 3 基于空间分集的盲均衡算法

文献[8]提出的合并均衡器的系数是基于自适应算法的调整, 需要训练序列。对于非合作接收环境, 可以将其权值更新算法替代为盲均衡算法, 如 CMA(Constant Modulus Algorithm)和 MMA(Multi-Modulus Algorithm)算法<sup>[10]</sup>, 形成一种空间分集盲均衡算法, 如图 5 所示。

由于 MMA 算法具有相位纠正的能力, 本文盲均衡算法采用 MMA 算法。

假设有  $N$  条支路,  $x_i(n)$  为第  $i$  路输入信号,  $w(n)$  为均衡器系数,  $N_F \times N$  为均衡器长度,  $N_F$  为均衡器支路长度,  $y(n)$  为输出,

$$x_i(n) = [x_i(n), x_i(n-1), \dots, x_i(n-N_F+1)]^T \quad (2)$$

$$x(n) = [x_1(n)^T, x_2(n)^T, \dots, x_N(n)^T]^T \quad (3)$$

$$w(n) = [w_1(n), w_2(n), \dots, w_{N_F \times N}(n)]^T \quad (4)$$

$$y(n) = w(n)^H x(n) \quad (5)$$

MMA 算法权值更新如下:

$$w(n+1) = w(n) - \mu y(n) e^*(n) \quad (6)$$

$$\begin{cases} e(n) = e_R(n) + j e_I(n) \\ e_R(n) = \text{Re}[y(n)] \cdot [R_R - |\text{Re}[y(n)]|^2] \\ e_I(n) = \text{Im}[y(n)] \cdot [R_I - |\text{Im}[y(n)]|^2] \end{cases} \quad (7)$$

$$R_R^2 = E\{s_R^4(n)\} / E\{s_R^2(n)\} \quad (8)$$

$$R_I^2 = E\{s_I^4(n)\} / E\{s_I^2(n)\} \quad (9)$$

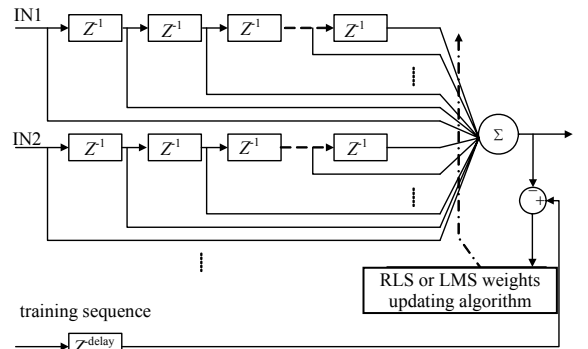


Fig.4 Combiner-equalizer of paper[8]  
图 4 文献[8]中的合并均衡器

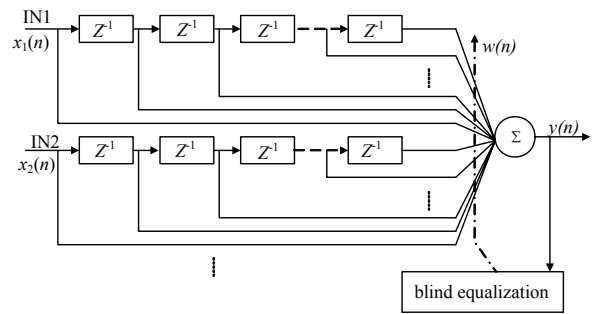


Fig.5 Structure of blind spatial diversity equalizer  
图 5 空间分集盲均衡结构

式中:  $s(n)$  是发射信号; T 表示转置; \* 表示共轭; H 表示共轭转置。

#### 4 性能分析

为进一步验证算法性能, 采用 4QAM 信号, 实验采用 2 条支路信道<sup>[11]</sup>, 其脉冲响应分别为:

$$h_1 = [0.4854 - j0.0971, 0.364 + j0.4368, 0.2427, 0.2912 - j0.3155, 0.1941 + j0.3883]$$

$$h_2 = [0.6662 - j0.8427, 1.6363 - j0.2503, -0.0016 - j0.4102]$$

a) 分集均衡与直接分集合并、单路信号均衡的性能对比

图 6 中分集合并表示只进行 2 路信号的合并, 不经过均衡处理的误符号率(Symbol Error Rate, SER); chan1, chan2 分别表示信号在单独通过信道  $h_1$  及信道  $h_2$  条件下, 各采用 MMA 算法(均衡器长度都为 7, 步长都为 0.01)在不同信噪比条件下的误符号率。本文分集均衡器通过的 2 条支路分别为  $h_1$  和  $h_2$ , 分集均衡器长度为  $7 \times 2$ , 均衡器支路长度为 7, 步长都为 0.01。由图 6 可以看出, 在频率选择性衰落条件下, 分集合并本身并不能克服 ISI 的影响; 本文分集均衡算法误符号率在不同信噪比条件下性能优于单路信号均衡结果。

b) 支路信号存在相位差的影响

为讨论支路信号间的相位差对算法的影响, 实验中对支路 1 的输入信号乘以  $e^{j\theta}$ , 其中  $\theta \in (0-2\pi)$  (实验中均衡器长度为  $7 \times 2$ , 均衡器支路长度为 7, 步长为 0.01)。实验结果如图 7 所示(图中横坐标为  $\times \pi$ ), 可以看出无论在高低信噪比条件下, 2 路信号间的相位差对算法的 SER 没有任何影响。另外, 由于实际信号解调过程中, 各支路信号的频差是影响解调效果的重要因素, 可以结合载波恢复算法克服频差影响, 对于支路信号间的残余相差, 由实验结果看出, 可以通过本文算法克服相差的影响。

c) 支路信号间存在延迟的影响

表 1 和表 2 分别是低信噪比和高信噪比条件下, 采用均衡器长度为  $7 \times 2$  时, 算法在不同延迟时的误符号率。图 8 是采用本文空间分集盲均衡算法对支路信号间存在不同的延迟的均衡结果。实验中均衡器长度分别为  $7 \times 2, 9 \times 2, 11 \times 2$ , 均衡器支路长度分别为 7, 9, 11, 步长都为 0.01, 进行 2 次实验, 2 次实验信噪比分别为 10 dB(图 8(a))和 20 dB(图 8(b))。可以看出, 在低信噪比条件下, 当 2 路信号间延迟分别小于 4, 5, 6 时, 即延迟小于均衡器支路长度一半时, 算法的均衡效果与 2 路信号同步时性能几乎一致; 在高信噪比条件下, 当 2 路信号间延迟分别小于 7, 9, 11 时, 即延迟小于均衡器支路长度时, 算法的均衡效果与 2 路信号同步时性能几乎一致; 无论是在高信噪比还是低信噪比只要 2 路信号间的延迟大于均衡器支路长度, 均衡作用失效。因此, 在支路信号间存在较大延时, 一方面可以通过增大均衡器的长度来提高算法对支

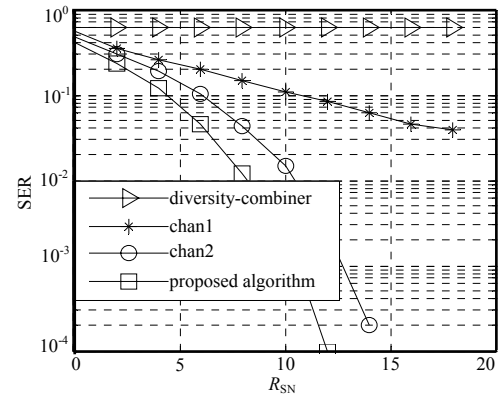


Fig.6 SER performance analysis of diversity-combiner, single channel equalizer and proposed equalizer  
图 6 分集均衡与直接分集合并、单路信号均衡的性能对比

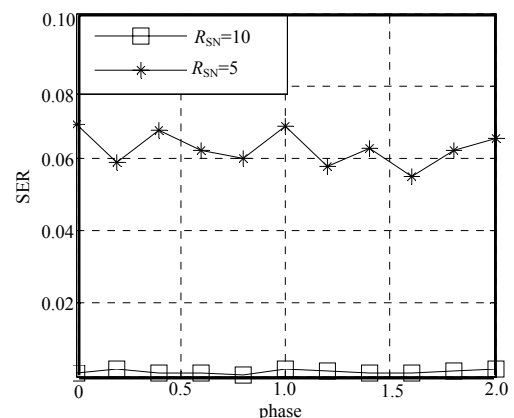


Fig.7 SER performance versus branch channels phase rotation  
图 7 支路信号存在相位差的影响

表 1 低信噪比条件下延迟对 SER 的影响(均衡器阶数为 14)

Table1 SER performance in low SNR channels(equalizer length=14)

|                | delay=0 | delay=1 | delay=2 | delay=3 | delay=4 | delay=5 |
|----------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| $R_{SN}=2$ dB  | 0.160 6 | 0.176 0 | 0.167 4 | 0.207 8 | 0.255 0 | 0.245   |
| $R_{SN}=4$ dB  | 0.098 8 | 0.117 2 | 0.113 8 | 0.122 6 | 0.196 6 | 0.160   |
| $R_{SN}=6$ dB  | 0.040 0 | 0.036 0 | 0.038 8 | 0.050 0 | 0.154 2 | 0.171   |
| $R_{SN}=8$ dB  | 0.008 6 | 0.009 6 | 0.014 2 | 0.015 6 | 0.074 4 | 0.098   |
| $R_{SN}=10$ dB | 0.001 6 | 0.002 0 | 0.008 8 | 0.008 8 | 0.038 8 | 0.039   |

表2 高信噪比条件下延迟对SER的影响(均衡器阶数为14)

Table2 SER performance in high SNR channels (equalizer length=14)

|                | delay=0 | delay=2 | delay=4 | delay=6 | delay=8 | delay=10 |
|----------------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|
| $R_{SN}=20$ dB | 0       | 0       | 0       | 0       | 0.3824  | 0.338 2  |
| $R_{SN}=22$ dB | 0       | 0       | 0       | 0       | 0.3030  | 0.346 0  |
| $R_{SN}=24$ dB | 0       | 0       | 0       | 0       | 0.3310  | 0.334 2  |
| $R_{SN}=26$ dB | 0       | 0       | 0       | 0       | 0.2762  | 0.348 2  |
| $R_{SN}=28$ dB | 0       | 0       | 0       | 0       | 0.3462  | 0.439 8  |

路信号间延迟的鲁棒性;另一方面,由于随着均衡器阶数的增大必然会带来收敛速度的减慢和计算量的增大,因此可以通过一些简单的时延估计算法,使支路信号间的时延差约束在均衡器的时延纠正范围内,以克服支路时延带来的不利影响。

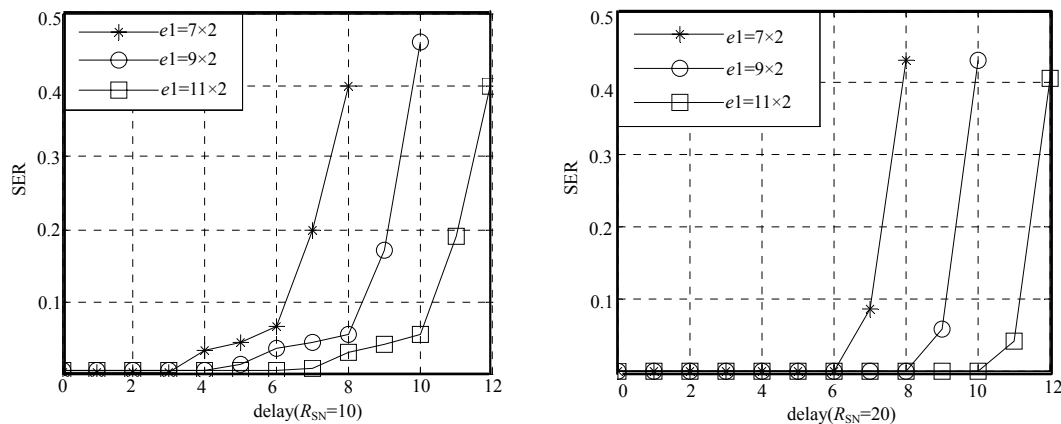


Fig.8 SER performance versus branch channels delay( $el$ :equalizer length)

图 8 支路信号间存在延迟的影响( $el$  表示均衡器长度)

## 5 结论

提出一种空间分集盲均衡算法,该算法将多天线支路间的合并权值和均衡器的权值计算统一合并于盲均衡算法的系数估计,省去了分集合并过程中的权值计算过程,也不需要精确的同步处理,大大降低了分集均衡处理的复杂度。仿真实验表明,该空间分集盲均衡算法性能优于单路均衡性能;算法对支路信号间存在任意相位差都有很好的均衡效果;2路信号间存在延迟时,只要延迟小于均衡器支路长度的一半,算法的均衡效果与2路信号同步时性能几乎一致,也就是说,在2路信号间存在较大延迟时可以通过增大均衡器的长度来提高算法对支路信号间延迟的鲁棒性或者结合一些简单的时延估计算法,使支路信号间的时延差约束在均衡器的时延纠正范围内。

## 参考文献:

- [1] 高敏,郭业才,杨超. 基于正交小波的前馈神经网络盲均衡算法[J]. 信息与电子工程, 2010,8(4):401-406. (GAO Min, GUO Yecai, YANG Chao. Blind equalization algorithms based on orthogonal wavelet transform and feed-forward neural network[J]. Information and Electronic Engineering, 2010,8(4):401-406.)
- [2] Mosen P. Digital transmission performance on fading dispersive diversity channels[J]. IEEE Transactions on Communication, 1977,25(12):1499-1500.
- [3] Tong L, Xu G, Kailath T. Blind identification and equalization based on second-order statistics: a time domain approach[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1994,40(2):340-349.
- [4] 倪俊红,刘泽民. 基于 FIR 多滤波器组的盲信道估计方法的改进[J]. 信息与电子工程, 2007,5(3):161-164. (NI Junhong, LIU Zemin. An improved blind channel estimation using FIR multirate filterbanks[J]. Information and Electronic Engineering, 2007,5(3):161-194.)
- [5] Adem Coskun, Izzet Kale. Blind correlation-based DFE receiver for the equalization of single input multi output communication channels[C]// IEEE Wireless Telecommunications Symposium. London:[s.n.], 2009:1-5.
- [6] Adem Coskun, Izzet Kale. A Blind implementation of multi-dimensional matched filtering in a maximum-likelihood receiver for SIMO channels[C]// IEEE International Instruction and Measurement Technology Conference. London:[s.n.], 2009:633-637.
- [7] GUO Yecai, DING Xuejie. Fractionally spaced blind equalization algorithm based on spatial diversity and orthogonal wavelet transforms[C]// 2010 International Conference on Intelligent Computing and Cognitive Information. Malaysia. Kuala Lumpur:[s.n.], 2010:321-324.
- [8] Ligia Chira Cremene, Nicolae Crisan, Marcel Cremene. An adaptive combiner-equalizer for multiple-input receivers[J]. Novel Algorithms and Techniques in Telecommunications and Networking, 2010,1007(10):385-390.
- [9] Kareem Emile Baddour. Analysis of optimum diversity combining and equalization for dispersive fading channel communications[D]. Kingston, Canada: Queen's University, 1998.

- [10] He L, Admin M G, Reed C, et al. A hybrid adaptive blind equalization algorithm for QAM signals in wireless communication[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2004, 52(7): 2058–2069.
- [11] Joel Labat, Christophe Laot. Blind adaptive multiple-input decision-feedback equalizer with a self-optimized configuration[J]. IEEE Transactions on communications, 2001, 49(4): 646–654.

#### 作者简介:



薛 江(1986–), 男, 山西省运城市人, 在读硕士研究生, 研究方向为信号分析与处理. email: xuejiang0359@163.com.

彭 华(1973–), 男, 江西省萍乡市人, 教授, 博士生导师, 研究方向为信号分析与处理.

马金全(1975–), 男, 甘肃省张掖市人, 讲师, 博士, 研究方向为信号分析与处理.

(上接第 573 页)

#### 参考文献:

- [1] Broun W J. Data Processing for the Westerbork Synthesis Radio Telescope[D]. Holland: University of Leiden, 1971.
- [2] Spoelstra T A Th, Kelder H. Effects produced by the ionosphere on radio interferometry[M]. Netherlands: Netherlands Foundation for Radio Astronomy, 1983.
- [3] 钱志瀚, 邬林达. 甚长基线射电干涉测量[M]. 北京: 测绘出版社, 1983.
- [4] Wang J, Liu X, Zhou Z. Minimum-entropy phase adjustment for ISAR[J]. Proc. Radar Sonar and Navig., 2004, 151(4): 203–209.
- [5] 张宏洲, 王军锋, 郁文贤. 海洋合成孔径雷达图像的一种高效压缩方法[J]. 信息与电子工程, 2010, 8(5): 501–504.
- [6] 朱铮涛, 黎绍发, 陈华平. 基于图像熵的自动聚焦函数研究[J]. 光学精密工程, 2004, 12(5): 537–542.
- [7] 孙君顶, 丁振国, 周利华. 基于图像信息熵与空间分布熵的彩色图像检索方法[J]. 红外与毫米波学报, 2005, 24(2): 135–139.

#### 作者简介:



张雄彬(1985–), 男, 江西省抚州市人, 在读硕士研究生, 研究方向为射电天文信号处理. email: zxbinga@gmail.com.

王军锋(1971–), 男, 河南省平顶山市人, 博士, 副教授, 主要研究方向为雷达信号处理、医学信号处理、一般性的信号处理.