

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2014.01.006

引用格式:赵培洪,王红星,平殿发,等.基于稀疏编码的TPM通信噪声抑制分析[J].电讯技术,2014,54(1):29-33.[ZHAO Pei-hong, WANG Hong-xing, PING Dian-fa, et al. Analysis of TPM Communication Noise Suppression Based on Sparse Coding [J]. Telecommunication Engineering, 2014, 54(1): 29-33.]

基于稀疏编码的 TPM 通信噪声抑制分析*

赵培洪^{1,2,**}, 王红星¹, 平殿发¹, 卢卫², 毛忠阳¹

(1. 海军航空工程学院 电子信息工程系, 山东 烟台 264001; 2. 解放军 91006 部队, 合肥 231064)

摘要:基于独立成分分析(ICA)时域滤波的时相调制(TPM)通信系统中的噪声干扰对系统性能有很大的影响。采用稀疏编码方法对TPM通信中的噪声进行抑制。首先对观测信号采用稀疏编码方法进行稀疏编码,然后对处理后的信号使用压缩方法处理,从而将ICA过程中对噪声所代表的小的变元值变小或置零,最终达到对噪声的削弱。仿真表明,稀疏编码方法对TPM通信中的噪声确实有较好的抑制,与不采用所提方法相比,大约有1 dB的系统误码性能提高。

关键词:时相调制;独立成分分析;稀疏编码;噪声抑制

中图分类号:TN919 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2014)01-0029-05

Analysis of TPM Communication Noise Suppression Based on Sparse Coding

ZHAO Pei-hong^{1,2}, WANG Hong-xing¹, PING Dian-fa¹, LU Wei², MAO Zhong-yang¹

(1. Department of Electronic Engineering, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China; 2. Unit 91006 of PLA, Hefei 231064, China)

Abstract:The noise interference would bring tremendous influence on the Time-phase modulation system based on Independent Component Analysis(ICA) time domain filtering. This paper adopts sparse coding technology to suppress noise for time-phase modulation(TPM) communication signals. Firstly, sparse coding method is adopted to encode with regard to observation signals and then the processed signals are compressed, thus these small argument-values are substituted by smaller or zero value and the noise is suppressed. The simulation shows that sparse coding method has suppressed noise better for the TPM communication system and it can improve approximately 1 dB of system error performance.

Key words:TPM system; independent component analysis; sparse coding; noise suppression

1 引言

时相调制^[1](Time-phase Modulation, TPM)是近年来为提高频带利用率而被提出来,利用离散时刻点携带信号信息的通信调制方法,它与脉位反相键控技术(Phase Reversal Keying, PRK)^[2]和扩展二元

相移键控调制(Expanded Binary Phase Shift Keying, EBPSK)技术^[3]等一样,主要特点是在特定的时刻产生相位突变。瞬间的相位跳变使得时相调制的功率谱扩展很宽^[4],而信号携带的信息就位于这些扩展的频谱中,因此在频域上难以采用带通或低通滤

* 收稿日期:2013-10-18;修回日期:2014-01-10 Received date:2013-10-18;Revised date:2014-01-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60772056);山东省“泰山学者”建设工程项目

Foundation Item:The National Natural Science Foundation of China(No. 60772056); Project Supported by “Taishan Scholar” Special Foundation of Shandong Province

** 通讯作者:zph1980@163.com Corresponding author:zph1980@163.com

波器进行滤波,因而采用时域方法对 TPM 信号的特征提取是可行的思路。由于独立成分分析 (Independent Component Analysis, ICA) 技术在图像识别、生物医学、故障诊断等^[5-7] 方面的广泛应用,将其用于时相调制系统中提取 TPM 信号的相位突变特征是比较好的选择。但是,对于 ICA 求解模型而言,已知信息量少,仅知道多个传感器接收的观测信号,由观测信号采用 ICA 算法估计发射信号本身已有难度,若再考虑信道噪声和传感器噪声,则无疑使 ICA 模型的求解更加困难^[8]。而且,TPM 信号的“0”、“1”调制信号波形差异很小,一般的平滑方法很容易抹去这种差异,因而需要对 ICA 模型中的噪声采用其他降噪方法。本文考虑采用稀疏收缩方法对 TPM 通信中的噪声进行抑制,稀疏编码可以将观测矩阵变换成一个具有超高斯性的编码,然后对编码使用压缩方法,从而将混合信号中的噪声所代表的小的变元值变小或置零,从而达到对噪声的削弱。

2 基于 ICA 的时相调制模型及噪声的影响

2.1 时相调制定义

时相调制的原理是:根据二进制信息位的不同,在正弦载波的特定时刻产生相位跳变,这样信息被调制到特定时刻的相位突变上^[9]。TPM 已调信号表达式为

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} [a_n \cdot s_1(t - nT_b) + (1 - a_n) \cdot s_0(t - nT_b)] \quad (1)$$

其中:

$$s_0(t) = A \sin(2\pi f_c t), 0 < t \leq T_b \quad (2)$$

$$s_1(t) = \begin{cases} A \sin(2\pi f_c t), & 0 \leq t \leq \tau_1 \\ A \sin(2\pi f_c t + \theta), & \tau_1 < t \leq T_b \end{cases} \quad (3)$$

其中, $\{a_n\}$ 为二进制数字序列“0”或者“1”; $s_0(t)$ 和 $s_1(t)$ 分别表示数字“0”和“1”的调制波形; A 为幅度; f_c 为载波频率; T_b 为比特周期; θ 为相位突变角; τ_1 为相位突变时刻点, $T_b - \tau_1$ 即为码元“1”中相位突变的持续时间长度。一般情况下,假定 $\theta = \pi$, 也就是码元“0”时间段内不发生相位突变,相位突变发生在码元“1”中较短的一个时间段内。

2.2 基于 ICA 的时相调制模型

时相调制通信系统中,假定发射端发射 n 路 TPM 信号 $s_j(t)$ ($j=1, 2, \dots, n$), 接收端有 m 个接收机进行接收,接收的 m 个信号 $x_i(t)$ 称为观测信号, $i=1, 2, \dots, m$, 且 $m \geq n$ 。 $x_i(t)$ 均由 $s_j(t)$ 线性混合组

成 $x_i(t) = \sum_j a_{ij} s_j(t)$, 矩阵模型

$$\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_m(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1(t) \\ s_2(t) \\ \vdots \\ s_n(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_{o1}(t) \\ n_{o2}(t) \\ \vdots \\ n_{on}(t) \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中, $n_o(t) = [n_{o1}(t), n_{o2}(t), \dots, n_{on}(t)]^T$ 为噪声。

令

$$\mathbf{x}(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_m(t)]^T,$$

$$\mathbf{s}(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_n(t)]^T,$$

则 ICA 模型可写为

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{A}\mathbf{s}(t) + \mathbf{n}_o(t) \quad (5)$$

由 ICA 模型可知,接收者所知道的只有观测信息 $\mathbf{x}(t)$, 而矩阵系数 \mathbf{A} 和信号源 $\mathbf{s}(t)$ (TPM 信号) 均未知,仅由多个观测信号 $\mathbf{x}(t)$ 根据一定的算法估计混合矩阵 $\tilde{\mathbf{A}}$ 及信源 $\tilde{\mathbf{s}}(t)$, 这是 ICA 算法的基本原理。关于 ICA 的算法实现已有多种^[9], 但所有这些算法中,噪声的存在对估计结果都会产生不容忽视的影响。

2.3 噪声对基于 ICA 的时相调制系统的影响

考虑 3 路 TPM 信号,如图 1,只截取前 6 个码元时间长度。虽然未来通信传输技术向高速发展,但对于实验仿真来说,设定高速率并无必要,而且对于结果没有大的影响,因而本文设定信息传输速率为 1 kb/s,载波频率相同,均为 10 kHz,只是每路 TPM 信号相位突变时间点不同,采样速率是载波频率的 10 倍,即 100 kHz。基于 ICA 时域滤波的 TPM 通信系统中,不考虑噪声的情况下,在接收端设置 3 个接收机接收得到 3 个观测信号(见图 2(a)、图 2(c)和图 2(e)),每个观测信号图 1 中所示的 TPM 信号混合,经 ICA 时域滤波处理后,估计出的信号见图 2(b)、图 2(d)和图 2(f)。

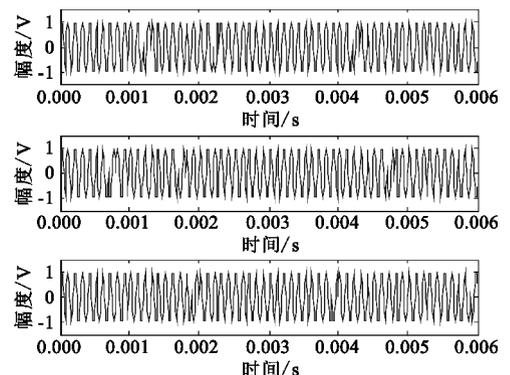


图 1 3 路 TPM 信号
Fig. 1 Three TPM signals

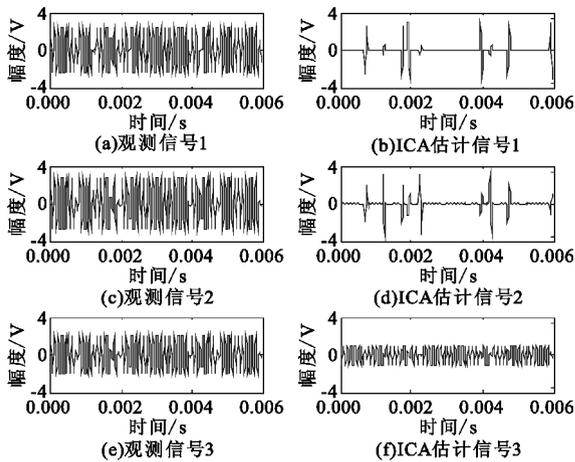


图 2 无噪声情况下观测信号及 ICA 估计信号
Fig. 2 The observed signals and estimated signals of ICA without noise

从图 2 可以看出, 观测信号经 ICA 时域滤波处理后, 估计的信号分为两大部分, 其中一部分包含所有相位突变时长内的信号, 它表明经 ICA 处理可以将 TPM 信号的相位突变部分体现出来, 换句话说 ICA 技术可以提取 TPM 信号的相位突变特征。如果没有噪声干扰的情况, 将 TPM 信号相位突变特征提取后, 利用同步技术并通过幅度门限判决很容易的将发射的数字信号恢复出来。

下面考虑噪声对 ICA 估计结果的影响。在分析通信系统时, 人们一般均假定信道为 AWGN 信道, 本文也假定 TPM 信号 $s_i(t)$ 发射后受高斯白噪声影响。信噪比为 2 时估计出的 3 个信号分量为图 3(a)、图 3(c) 和图 3(e), 信噪比为 6 时估计出的 3 个信号分量为图 3(b)、图 3(d) 和图 3(f)。

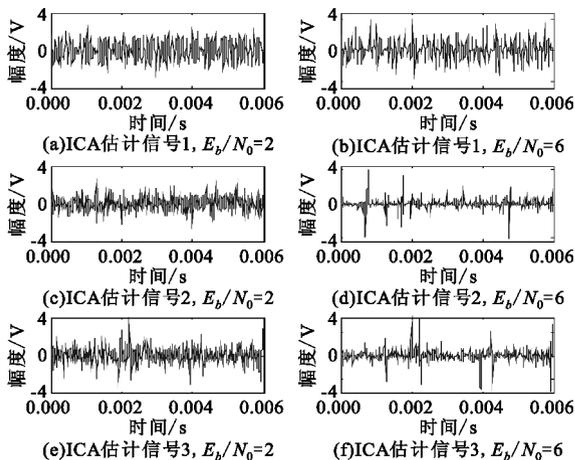


图 3 ICA 估计结果 (未经滤波, E_b/N_0 为 2 和 6)
Fig. 3 Estimation results of ICA without filtering, E_b/N_0 is equal to 2 and 6

从图 3 可以看出, 噪声对 ICA 估计产生了较大的影响, 尤其是信噪比较低的时候, 这种影响是显而易见的。如信噪比 $E_b/N_0=2$ 时, 从估计出的信号中提取的时相调制相位特征不明显, 判决解调存在一定的困难。

3 稀疏编码对噪声的抑制

稀疏编码是指对多维数据寻找一种神经网络表征的过程, 在这个神经网络里, 只有少数的一些神经元权值起到主要作用^[10]。稀疏编码的关键问题就是要找到一个神经网络矩阵, 使信号经过该矩阵转换后得到的分量具有稀疏分布。之所以考虑对基于 ICA 的 TPM 通信系统中的噪声进行稀疏编码降噪, 原因在于 ICA 模型求解算法的预处理中需要对观测矩阵进行白化也就是正交变换处理, 而这种正交变换使得处理后的信号有尽可能的稀疏成分, 之后可以对观测信号进行压缩处理。

对于 ICA 模型来说, 由于信号受信道中的高斯白噪声影响, 则接收的观测信号变为 $\mathbf{x}(t) = \mathbf{A}\bar{\mathbf{s}}(t)$ 。 $\bar{\mathbf{s}}(t) = \mathbf{s}(t) + \mathbf{n}(t)$ 是受噪声污染的信号, 对观测信号 $\mathbf{x}(t)$ 进行白化处理使得 $\mathbf{x}\mathbf{x}^T = \mathbf{I}$ 。这意味着将矩阵 \mathbf{A} 变成了正交矩阵, 因此有

$$\mathbf{x}\mathbf{x}^T = \mathbf{A}\bar{\mathbf{s}} \cdot (\mathbf{A}\bar{\mathbf{s}})^T = \mathbf{A}(\bar{\mathbf{s}} \cdot \bar{\mathbf{s}}^T)\mathbf{A}^T = \mathbf{A}\mathbf{A}^T = \mathbf{I} \quad (6)$$

因为 \mathbf{A} 是正交矩阵, 使得 $\mathbf{x} = \mathbf{A}\bar{\mathbf{s}}$ 具有尽可能的稀疏成分, 白化过程实际上具有稀疏编码的作用。接下来, 在对观测信号 ICA 估计之前对其做某种压缩处理, 即

$$\mathbf{x}' = f(\mathbf{A}\bar{\mathbf{s}}) \quad (7)$$

函数 $f(s)$ 单独作用于 $\mathbf{A}\bar{\mathbf{s}}$ 的每个成分上。当观测信号中含有噪声且 \mathbf{A} 已是正交矩阵的情况下, 函数 $f(x)$ 可由下式给出^[11]:

$$f(x) = \frac{1}{1-\sigma^2} \text{sign}(x) \max(0, |x| - \sqrt{2}\sigma^2) \quad (8)$$

其中, σ^2 是噪声成分 $n(t)$ 的方差, 其值由信噪比公式计算得到。因为 $\text{snr} = 10 \lg \frac{E_x}{E_n}$, 其中 E_x 是发射信号平均功率, E_n 是噪声平均功率, 根据发射功率可算得噪声平均功率为

$$E_n = \frac{E_x}{10^{\text{snr}/10}} \quad (9)$$

当信噪比取不同值时, 由式(9)求得噪声平均功率

也就是噪声方差,代入式(8)得到非线性压缩函数 $f(\cdot)$ 。

式(8)是一个非线性函数,实际上是一个压缩函数^[12],压缩函数作用于观测信号的结果就是通过确定的值降低低幅区域的噪声幅度值,小的成分因此被置换成零。

因此,稀疏编码压缩法降噪的步骤如下:

(1)对观测信号进行某种正交变换也就是稀疏编码使得 $\mathbf{x} = \mathbf{A}\bar{\mathbf{s}}$ 具有尽可能的稀疏成分;

(2)对 $\mathbf{x} = \mathbf{A}\bar{\mathbf{s}}$ 运用(5)式中的非线性压缩函数 $f(\cdot)$ 进行压缩变换;

(3)选用 ICA 算法进行估计。本文选用 ICA 算法中应用最广泛的 FastICA 方法求 ICA 模型的逆,由式子 $\tilde{\mathbf{s}}(t) = \mathbf{A}^T \tilde{\mathbf{x}}(t)$ 得到新的估计值 $\tilde{\mathbf{s}}(t)$ 。

4 数据仿真

依然采用第 2 节中所用的信号数据,信噪比分别为 2 和 6 时,经过对噪声抑制处理后,仿真得到不同信噪比下的 ICA 处理结果,如图 4 所示。

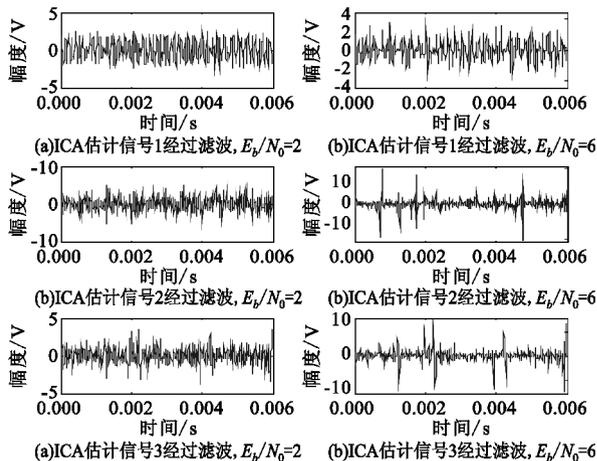


图 4 噪声经过抑制后的 ICA 估计信号

Fig. 4 Estimated signals of ICA through suppressing noise

将图 4 和图 3 对比可见,在相同信噪比情况下,经过噪声抑制后的估计信号效果改善明显,ICA 提取的 TPM 相位突变特征更突出。同样是采用幅度门限判决,经过噪声抑制后的信号显然可以提供更直观、更准确的判决数据。如果这还不能说明问题的话,下面对时相调制信号经过稀疏编码压缩法抑制噪声和不经该方法的系统误码性能做个仿真比较,如图 5 所示。

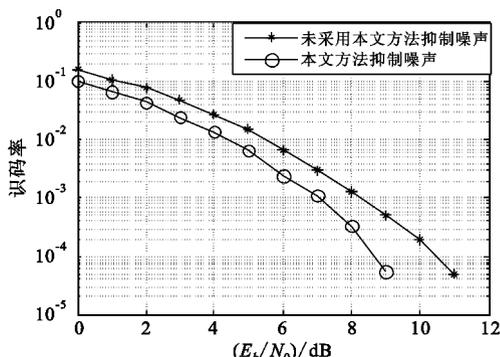


图 5 误码率仿真

Fig. 5 Bit error rate simulation

从图 5 可以看出,时相调制采用 ICA 滤波,经过对估计后信号采用稀疏编码压缩,可以有效提高系统误码性能,在低信噪比时大约提高 1 dB 的性能,在高信噪比时大约提高 1 ~ 2 dB 的性能。

5 结论

基于 ICA 时域滤波构建的 TPM 通信系统中噪声对相位突变特征提取有较大影响,而受 ICA 模型所限,噪声去除比较困难。本文在基于 ICA 的时相调制通信系统中,引入稀疏编码与压缩方法对信号中所叠加的高斯噪声进行抑制,然后采用 FastICA 算法对观测信号进行估计,提取 TPM 信号相位突变特征,可操作性高。最后的仿真表明,采用该方法抑制噪声后,相位突变特征显现更明显,而且系统的误码性能获得不小的提升。对于 TPM 信号来说,无论是 PRK 还是 EBPSK 形式,区别在于相位突变时刻点的不同,ICA 对 TPM 相位特征的提取并未限于任意时刻,本文所提方法是对基于 ICA 的 TPM 通信系统性能的一种改善。当然,文中主要考虑的是 AWGN 信道,后续研究将针对非高斯白噪声信道情况进行。

参考文献:

[1] 王红星,王洪利,舒轶昊,等. 时相调制的循环相关匹配滤波技术研究[J]. 无线电通信技术,2010,36(1): 10-12,25.
WANG Hong-xing, WANG Hong-li, SHU Yi-hao, et al. Study on Cyclic Correlation Matched Filtering on Time-phase Modulation [J]. Radio Communications Technology, 2010, 36(1): 10-12, 25. (in Chinese)

[2] Walker H R. Pulse position phase reversal keying (3PRK): USA, 6445737[P], 2002-07-16.

[3] 张士凯,吴乐南. EBPSK 调制信号功率谱分析[J]. 电波科学学报,2008,23(3): 496-500.

- ZHANG Shi-kai, WU Le-nan. PSD analysis of EBPSK modulated signals [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2008, 23(3): 496-500. (in Chinese)
- [4] 王红星,王洪利,毛忠阳. 基于循环谱特性的扩展二元相移键控解调算法[J]. 电波科学学报, 2010, 25(5): 934-939.
- WANG Hong-xing, WANG Hong-li, MAO Zhong-yang. Demodulation algorithm for EBPSK based on cyclic spectrum characteristic [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2010, 25(5): 934-939. (in Chinese)
- [5] 钟家强,王润生. 基于独立成分分析的多时相遥感图像变化检测[J]. 电子与信息学报, 2006, 28(6): 994-998.
- ZHONG Jia-qiang WANG Run-sheng. Multitemporal Remote Sensing Images Change Detection Based on ICA [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2006, 28(6): 994-998. (in Chinese)
- [6] Lee J H, Jung H Y. Speech feature extraction using independent component analysis [C]//Proceedings of 2000 International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing. Istanbul, Turkey: IEEE, 2000: 1631-1634.
- [7] 齐爱玲,白焕莉,马宏伟,等. 一种基于 ICA 的机械缺陷超声信号提取方法[J]. 西安科技大学学报, 2012, 32(3): 394-397.
- QI Ai-ling, BAI Huan-li, MA Hong-wei, et al. A method of mechanical defect ultrasonic signal extraction based on ICA [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2012, 32(3): 394-397. (in Chinese)
- [8] Hyvarinen A, Karhunen J, Oja E. Independent Component Analysis [M]. Helsinki: John Wiley & Sons, 2006: 141-156.
- [9] 毛忠阳,赵培洪,王红星,等. 一种基于非平稳信号分析的时相调制信号解调算法[J]. 海军航空工程学院学报, 2012, 27(5): 525-529.
- MAO Zhong-yang, ZHAO Pei-hong, WANG Hong-xing, et al. A demodulation algorithm for Time-Phase modulation based on non-stationary signal analyzing [J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2012, 27(5): 525-529. (in Chinese)
- [10] Potamitis I, Fakotakis N, Kokkinakis G. Speech enhancement using the sparse code shrinkage technique [C]//Proceedings of 2001 IEEE International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing. Salt Lake City: Springer, 2001.

- [11] Hyvarinen A, Oja E, Hoyer P, et al. Image feature extraction by sparse coding and independent component analysis [C]//Proceedings of Fourteenth International Conference on Pattern Recognition, IEEE, 1998: 1268-1273.

作者简介:



赵培洪(1980—),男,重庆巫山人,海军航空工程学院博士研究生,主要研究方向为现代通信技术、通信信号处理、非平稳信号分析与处理等;

ZHAO Pei-hong was born in Wushan, Chongqing, in 1980. He is currently working toward the Ph. D. degree. His research interests include modern communication technology, communication signal processing, and non-stationary signal analysis.

Email: zph1980@163.com

王红星(1962—),男,河南商丘人,海军航空工程学院电子信息工程系教授、博士生导师,主要研究方向为现代通信新技术、调制解调技术;

WANG Hong-xing was born in Shangqiu, Henan Province, in 1962. He is now a professor with the Ph. D. degree and also the Ph. D. supervisor. His research concerns modulation technology and modern communication technology.

平殿发(1965—),男,山东滨州人,博士,海军航空工程学院电子信息工程系教授,主要从事现代战争理论研究、电子战与信息战研究;

PING Dian-fa was born in Binzhou, Shandong Province, in 1965. He is now a professor with the Ph. D. degree. His research concerns modern war theory, electronic warfare and information warfare.

卢卫(1979—),男,陕西宝鸡人,高级工程师,主要研究方向为电子信息对抗与电子干扰;

LU Wei was born in Baoji, Shaanxi Province, in 1979. He is now a senior engineer. His research concerns electronic information warfare and electronic jamming.

毛忠阳(1979—),男,河南新乡人,博士,海军航空工程学院讲师,主要研究方向现代通信新技术、通信信号处理。

MAO Zhong-yang was born in Xinxiang, Henan Province, in 1979. He is now a lecturer with the Ph. D. degree. His research concerns modern communication technology and communication signal processing.