

杨保平, 陈永光, 孙 光. 一种电磁频谱管理盲监测技术[J]. 电波科学学报, 2014, 29(4): 786-791. doi: 10.13443/j.cjors.2013081501.

YANG Baoping, CHEN Yongguang, SUN Guang. A blind monitoring technology for electromagnetic spectrum management[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2014, 29(4): 786-791. (in Chinese). doi: 10.13443/j.cjors.2013081501.

一种电磁频谱管理盲监测技术

杨保平¹ 陈永光² 孙 光¹ 杨 鸾¹

(1. 洛阳电子装备试验中心, 河南 洛阳 471003; 2. 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094)

摘 要 复杂电磁环境下对无线电信号进行监测时, 基于时频分析的传统监测方式对频谱混叠信号难以进行识别. 针对这一问题, 提出了一种电磁频谱管理盲监测技术. 在分析研究了盲源分离的理论基础上建立了基于最大信噪比算法的盲监测模型, 基于该模型仿真实现了 6 路频谱混叠无线电信号的分离提取. 仿真结果表明: 应用所建立的模型能够实现频谱混叠无线电信号的监测分析, 判明所监测无线电设备的工作频率、信号形式和带宽等主要特征.

关键词 频谱管理; 盲监测; 最大信噪比

中图分类号 TN911.3 **文献标志码** A **文章编号** 1005-0388(2014)04-0786-06

A blind monitoring technology for electromagnetic spectrum management

YANG Baoping¹ CHEN Yongguang² SUN Guang¹ YANG Luan¹

(1. Luoyang Electronic Equipment Test Center of China, Luoyang Henan 471003, China;

2. Beijing Institute of Tracking and Telecommunication Technology, Beijing 100094, China)

Abstract The conventional monitoring method based on time-frequency analysis is difficult to recognize the spectrum overlapping radio signals under the condition of battle-field complex electromagnetic environment. A blind monitoring technology for electromagnetic spectrum management is proposed. The blind source separation(BSS) technique is analyzed theoretically and the blind monitoring model based on the algorithm of maximum signal-to-noise ratio is given. Applying the processing model, simulation is performed to separate and extract the six spectrum overlapping radio signals. The simulation demonstrates the presented BSS processing model can be used to monitor and analyze spectrum overlapping radio signals and enables a means for signal recognition. The parameters of radio equipment such as frequency, signal type, bandwidth and so on can be judged using the method.

Key words spectrum management; blind monitoring; maximum signal-to-noise ratio

引言

信息化条件下的联合作战必将在复杂电磁环境下进行,电磁频谱管理问题已成为制约当前作战准备和未来作战的一大难题.电磁频谱管理一是通过监测分析战场电磁频谱变化情况,及时调整我方各层次通信、指挥和控制系统的使用频率,保证作战指挥顺畅;二是根据电磁环境变化,及时准确地捕捉敌方电磁信息,为我方实施电磁攻击提供信息^[1].因此,频谱监测是整个无线电管理活动的数据库基础.

频谱监测是对管理地域的电磁频谱占用情况进行监测测量,分析处理监测数据,为频谱管理控制系统提供数据支撑.要高质量、高时效地对无线电信号进行监测,对非法干扰源进行迅速准确的分析、测向和查处,发现潜在的非法用户和发射源,进行合理、有效的频率分配和指配,必须依赖无线电监测技术.

传统意义上对无线电信号的频谱监测方式主要采用时频分析技术,对时域、频域或空域分离的无线电信号能够有效识别^[2].但在战场复杂电磁环境下,各种用频装备释放覆盖全电磁频段的雷达、通信和各种干扰信号,其中众多的无线电信号在时域、频域或空域上相互交叠,基于时频分析的频谱监测手段难以识别.盲源分离(Blind Source Separation, BSS)技术为解决这一难题提供了一个新的途径^[3].

1 盲源分离算法分析

1.1 最大信噪比算法

盲源分离是一种功能强大的信号处理方法,是当前的研究热点之一^[4],在众多领域得到了广泛应用^[5-7].盲源分离无需对所监测的无线电信号和传输信道特性具备先验知识,利用接收的无线电信号统计特性获取信号特征.

最大信噪比算法是众多 BSS 算法中的一种,最早于 20 世纪 70 年代由 Kulczyk 在激光多普勒系统中用来校准系统噪声水平^[8].经过几十年的发展,在雷达随机信号双谱分析、语音增强效果、空时编码和无损超声波检测等诸多领域得到应用^[9-12].该算法属矩阵特征值分解(Eigen Value Decomposition, EVD)^[13-14]方法,通过构造信噪比目标函数(Objective Function, OF)^[15],对矩阵进行特征分解或者广义特征分解(Generalized Eigen Value Decomposition, GEVD)估计分离矩阵,可直接找到闭形式解,具有算法简单和速度快等优点,便于实时处理和硬件实现.利用最大信噪比算法在电磁频谱管理中实

现频谱混叠无线电信号的盲监测.

1.2 目标函数构建

定义源信号 $S(n)$ 与估计信号 $Y(n)$ 之差为噪声信号,即

$$E(n) = S(n) - Y(n) \quad (1)$$

当 $E(n)$ 为最小值时,那么 $Y(n)$ 就是 $S(n)$ 的最优估计,盲源分离的效果最好,可认为提取了源信号.设 $S(n)$ 与 $E(n)$ 的功率比为信噪比, $E(n)$ 取得最小值等价于信噪比最大.根据这一准则构造信噪比目标函数^[16],见式(2),求解得到分离矩阵.

$$\begin{aligned} F_{\text{snr}} &= 10 \lg \frac{S \cdot S^T}{E \cdot E^T} \\ &= 10 \lg \frac{S \cdot S^T}{(S - Y) \cdot (S - Y)^T} \end{aligned} \quad (2)$$

求目标函数梯度,取最大值时其梯度为 0,根据文献[17]的结论计算出分离矩阵,得到源信号的最佳估计 $Y(n)$.实际应用中监测信号个数多少是未知的,需要通过信源个数估计算法获得.可采用已有方法^[18-22]为盲源分离算法提供足够的先验知识.

2 仿真及结果分析

为了体现复杂电磁环境条件和相互对照,仿真实现了对 6 路频谱混叠无线电信号的基于盲源分离技术的战场频谱管理盲监测,并对分离后获取的信号进行频域、调制域的分析处理,获取必要的参数情报信息.

2.1 仿真条件

为提高仿真效率,设置了较低的采样速率和信号频率,对于算法和分离过程并无影响.采样速率设为 56 kHz,仿真长度取 124 ms 信号长度(共 6944 采样点),采用的是 6 阵元圆形接收天线阵列,阻抗为 50 Ω .分离运算加入方差为 0.02 的高斯白噪声.

设计的 6 路源信号依次为 1 路双音信号,2 路参数相近的二进制频移键控(Frequency Shift Keying, FSK)数字通信信号,1 路二进制相移键控(Binary Phase Shift Keying, BPSK)数字通信信号,1 路采用差分四相相移键控(Differential Quadrature Phase Shift Keying, DQPSK)数字通信信号和 1 路雷达常用的线性调频 Chirp 信号.其中第 1 路双音信号数学模型为

$$\begin{aligned} s_1(t) &= A_1 \times \cos(2\pi f_1 t + \varphi_1) + \\ &\quad A_2 \times \cos(2\pi f_2 t + \theta_1). \end{aligned} \quad (3)$$

式中: A_1 、 A_2 为信号幅度,分别为 0.8 V 和 1 V; 双音频率 f_1 为 3.335 kHz, f_2 为 4.045 kHz; φ_1 、 θ_1 是

双音相位,分别为0和 $\pi/2$.

第2路是2FSK数字通信信号为

$$s_2(t) = A_3 \left(\sum_{n=1}^k a_{1n} g_1(t - nT_{1s}) \cos(2\pi(f_3 - \Delta f_1)t + \varphi_{1n}) + \sum_{n=1}^k \bar{a}_{1n} g_1(t - nT_{1s}) \cos(2\pi(f_3 + \Delta f_1)t + \theta_{1n}) \right). \quad (4)$$

式中: A_3 为信号幅度,取值为1 V; k 为数据位数; a_{1n} 为信号消息序列; $\bar{a}_{1n}$ 为 a_{1n} 反码; $g_1(t)$ 为脉宽为 T_{1s} 的单个矩形脉冲, T_{1s} 取2 ms(基带速率为500 bps); f_3 为信号载频,取值4 kHz; Δf_1 为调制频偏,取值2 kHz; φ_{1n} 、 θ_{1n} 分别是第 n 个信号码元的初始相位,均设置为0.

第3路信号是与第2路信号相近的2FSK无线电信号,其参数取值和定义略有不同,数学模型为

$$s_3(t) = A_4 \left(\sum_{n=1}^l a_{2n} g_2(t - nT_{2s}) \cos(2\pi(f_4 - \Delta f_2)t + \varphi_{2n}) + \sum_{n=1}^l \bar{a}_{2n} g_2(t - nT_{2s}) \cos(2\pi(f_4 + \Delta f_2)t + \theta_{2n}) \right). \quad (5)$$

式中: A_4 为信号幅度,取值为0.6 V; l 为数据位数; a_{2n} 为基带信号,为随机产生序列; $g_2(t)$ 为脉宽为 T_{2s} 的单个矩形脉冲, T_{2s} 取1 ms(基带速率为1 000 bps); f_4 为信号载频,取值4.3 kHz; Δf_2 为调制频偏,取值4 kHz; φ_{2n} 、 θ_{2n} 分别是第 n 个信号码元的相位,均设置为0.其中

$$a_{2n} = \begin{cases} 0, & \text{概率为 } p \\ 1, & \text{概率为 } (1-p) \end{cases} \quad (6)$$

$$\bar{a}_{2n} = \begin{cases} 0, & \text{概率为 } (1-p) \\ 1, & \text{概率为 } p \end{cases} \quad (7)$$

式中, p 是随机序列为0时的取值概率,取50%.

第4路为BPSK无线电信号,其信号数学模型如下:

$$s_4(t) = A_5 \times \left(\sum_{n=1}^m a_{3n} g_3(t - nT_{3s}) \cos(2\pi f_5 t + \varphi_{3n}) \right). \quad (8)$$

式中: A_5 为信号幅度,取值为1.2 V; m 为基带信号数据位数; a_{3n} 为基带信号,随机产生双极性码序列; $g_3(t)$ 为脉宽为 T_{3s} 的单个矩形脉冲, T_{3s} 取0.5 ms(基带速率为2 000 bps); f_5 为信号载频,取值为2.5 kHz; φ_{3n} 是第 n 个信号码元的相位,仿真时设置为0.其中

$$a_{3n} = \begin{cases} +1, & \text{概率为 } p \\ -1, & \text{概率为 } (1-p) \end{cases} \quad (9)$$

式中, p 是双极性码随机序列为+1时的取值概率,取50%.

第5路为 $\pi/4$ -DQPSK调制的无线电信号,

$$s_5(t) = A_6 \times \left(\sum_{n=1}^i I \times \cos(2\pi f_{(i)} t) + \sum_{n=1}^i Q \times \sin(2\pi f_{(i)} t) + A_7 \times \cos(2\pi f_0 t) \right). \quad (10)$$

式中: A_6 为信号幅度,取值为0.2 V; i 为调制单音数; I 、 Q 为进行调制前将基带二进制数字码流转换为差分双极性码后分成 I 、 Q 两路,然后进行正交调制; $f_{(i)}$ 为各调制单音频率; A_7 为信号幅度,取值为0.4 V; f_0 为多普勒校正音频率,取值为605 Hz.

第6路为线性调频Chirp信号为

$$s_6(t) = A_7 \times \sin(2\pi(f_6 + \Delta f_3 t)t + \varphi_{4n}). \quad (11)$$

式中: A_7 为信号幅度,取值为1 V; f_6 为初始载波频率,取值为733 Hz; Δf_3 为单位时间步进频率,取值5 kHz/s; φ_{4n} 为初始相位,设置为0.

根据以上建立的数学模型,6路源信号频谱波形见图1.其横轴为频率,单位是Hz,纵轴代表信号强度,由图1可见各路源信号在频域上互相交叉混叠.

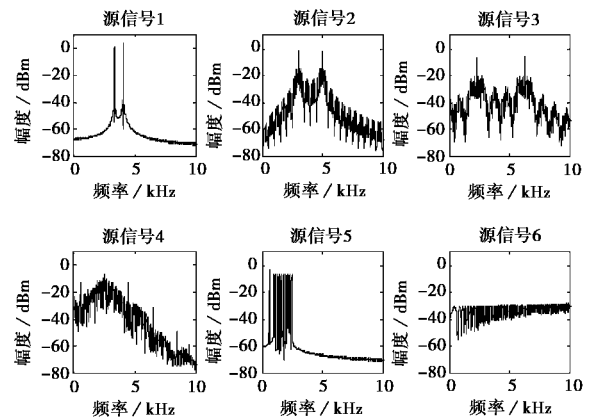


图1 源信号频谱仿真波形

2.2 仿真结果分析

6路源信号经过不同信道传播衰减,到达接收天线.接收天线阵列将传输后的源信号混合叠加输出,在监测系统接收端得到6路混合观察数据,经傅里叶变换后其频谱波形见图2.

每路信号频谱上已经失去源信号的频域特征,难以区分各路源信号.采用传统的频域滤波方法分

离混合信号行不通,因为不同无线电源信号的频谱相互混叠在一起,无法有效地设计滤波器.同样,基于空域滤波方式也难以进行,如果各路源信号来波方向来自同一方位,空域分离方法就失去了方向信息的判据,基于空域滤波算法失效.即使各路源信号来波方向不同,采用空域滤波方式需要高精度的测向支持,其花费和算法时间将大大增加.当电磁环境趋于复杂,源信号数量增加时,采用该方法效费比与性能将会大幅降低.

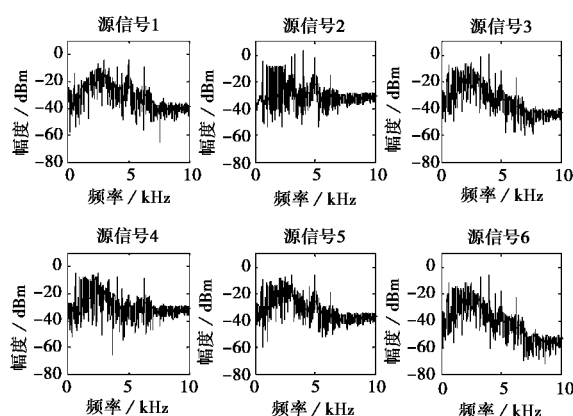


图2 接收的混合信号频谱仿真波形

采用建立的电磁频谱管理盲监测模型对6路频谱混叠源信号进行仿真.盲分离后的信号真实地还原了源信号,仿真结果见图3.

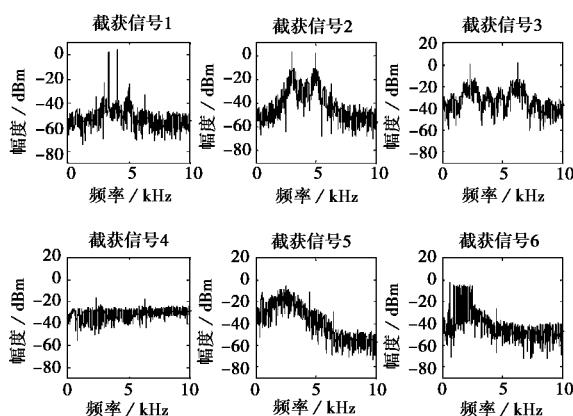


图3 截获信号频谱仿真波形

这里取相对信号强度(非真实源信号的强度),由于盲源分离的不确定性^[23],其信号强度为源信号的缩放,并不代表源信号的真实值.获取信号的次序也与源信号不同,部分信号与源信号相位相反.

电波监测时真正关心的是如何从混合信号中提取信号的波形和频率,其排列顺序、幅值和相位则是

次要的,因此不确定性并不影响盲源分离技术在无线电监测中的应用.信号真实幅值和相位信息可结合其它方法获取.

6路源信号设置不同的强度进行分别仿真,当任一源信号强度与其他信号强度相差达60 dB以上时仍能很好的恢复出各路源信号.但是每路源信号的强度至少必须比背景噪声高一个量级(约10 dB),当源信号的强度和噪声相当或低于噪声时,该路源信号波形恢复效果逐渐变差,但不影响其他源信号的恢复.

3 监测信号的特征提取

经过分离后已经获取了频谱混叠信号中每个源信号的波形,在实际无线电监测中可以加以利用.但是对于无线电监测在获取波形信息基础上,还要获取监测信号的调制方式、频率和带宽等参数信息,才能有效支持电磁频谱管理,这是非常重要和关键的一步.因此,在无线电监测中对于频谱混叠信号盲分离后,还要进一步进行频谱信息的分析和提取.

频谱分析通过对盲分离后各路信号进行傅里叶变换提取源频谱信息.根据监测信号频谱形状特征获取调制方式.根据获取的参数信息,为频率分配或干扰查处提供决策依据.提取各源信号的频谱信息后,在监测接收机人机界面上直观显示,满足战场复杂电磁环境下快速截获、判断目标信号实施电磁频谱管理的要求.

从频谱特征上可以明显看出第1路为2个单音信号,图3中可以看出频率约在3 kHz到4 kHz左右,经过分析测量的双音频率分别为3.335 kHz和4.045 kHz.

第2路和第3路从频谱特征上可以看出截获到的信号为典型的2FSK双峰频谱结构,信号中心频率分别约为4 kHz和4.3 kHz,从每个单峰的宽度可以得到基带速率分别约为1 kbps和500 bps,每路信号中两个单峰的距离可以得到调制频偏约为2 kHz和4 kHz.

第4路信号从频谱特征上可以看出为线性调频Chirp信号.

第5路信号为典型的BPSK数字通信信号,信号中心频率约为2.5 kHz,带宽约为2 kHz.

第6路信号频谱上可以看出包含16单音调制,具有某典型战术数据链的显著频谱特征.监测到目标信号后,可以进行后续分析识别处理,提取相关情报信息.

对比图 3 和图 1, 分离后经时频分析能够正确提取源频谱混叠信号中各个源信号的频谱及其包含的参数信息. 噪声对算法性能还是有一定的影响, 后续研究中在进行盲源分离处理前, 可以运用已有的频域或空域滤波技术、小波消噪和经验模式分解 (Empirical Mode Decomposition, EMD) 等多种消噪技术进行数据的预处理, 减小噪声对分离效果的影响.

如果将 6 路信号的频谱在一个图中显示, 则相互交叠, 很难直观和清晰的观察, 解决的办法是将每路信号分成多个子图 (屏幕分屏) 显示, 或者在同一图中使用不同颜色区分各信号, 处理后会更加清晰直观, 便于在战场复杂电磁环境下实施快速准确的截获. 结合电子对抗预先侦察获取的背景和目标信号的一些先验信息对监测结果进行处理, 能进一步提高频谱混叠目标信号盲监测截获概率.

4 结 论

对基于盲源分离最大信噪比算法的战场电磁频谱管理盲监测技术进行了探索, 进行了建模和仿真. 仿真结果表明, 该方法能够有效将源频谱混叠的多路无线电信号进行分离, 快速、准确地提取各源信号的波形和频谱信息, 仿真实现了对目标无线电信号的监测, 验证了算法的可行性.

在讨论和建模过程中对算法进行了一些简化. 在实际中, 还要考虑无线电信号传输的时延以及含噪 (包括有色噪声) 和欠定情况等, 算法和分析更为复杂, 所提出的战场电磁频谱管理盲监测技术在算法优化和硬件实现等方面都有待进一步深入研究.

参考文献

- [1] 董庆生. 电波与信息化[M]. 1 版. 北京: 航空工业出版社, 2009: 93-97.
- [2] AARDAL K I, VAN HOESEL C P M, KOSTER A M C A. Models and solution techniques for the frequency assignment problem[J]. Journal 4OR: Quarterly Journal of the Belgian, French and Italian Operations Research Societies, 2003, 1(4): 261-317.
- [3] HYVARINEN A, KARHUNEN J, OJA E. Independent component analysis [M]. New York: Wiley, 2001.
- [4] 史习智. 盲信号处理-理论与实践[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2008.
- [5] 张贤达, 保 铮. 盲信号分离[J]. 电子学报, 2001, 29(12A): 1766-1771.
- ZHANG Xianda, BAO Zheng. Blind source separation[J]. Acta Electronica Sinica, 2001, 29(12A): 1766-1771. (in Chinese)
- [6] 杨福生, 洪 波. 独立分量分析的原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [7] 段哲民, 马 裕, 彭 斌, 等. 基于盲源分离的商业销售计算机仿真分析[J]. 计算机仿真, 2009, 26(11): 308-311.
- DUAN Zheming, MA Yu, PENG Bin, et al. Computer simulation analysis of commercial sales based on blind source separation [J]. Computer Simulation, 2009, 26(11): 308-311. (in Chinese)
- [8] KULCZYK W K. Signal noise ratio in laser doppler systems[J]. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, 1973, 9.
- [9] ZALOGIN N N. Calculation of the signal noise ratio for random signal double spectral analysis radar[J]. Radio-technical Electronic, 1993, 12(38): 278-286.
- [10] PLAPOUS C, MARRO C. Improved signal-to-noise ratio estimation for speech enhancement [J]. IEEE Transactions on Audio, Speech and Language Processing, 2006, 6(14): 1024-1029.
- [11] SUH J. Maximum signal-to-noise ratio array processing for space-time coded systems[J]. IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, PIMRC, 2000, 9(1): 693-697.
- [12] VACLAV M. Signal-to-noise ratio enhancement based on wavelet filtering in ultrasonic testing[J]. Ultrasonics, 2009, 12(49): 752-759.
- [13] 高剑茹, 高宝成. 基于最大信噪比的盲源分离算法的修正与比较[J]. 电脑与信息技术, 2009, 17(1): 19-21.
- GAO Jianru, GAO Baocheng. Revision and Comparison of blind source separation algorithm based on maximum signal noise ratio [J]. Computer and Information Technology, 2009, 17(1): 19-21. (in Chinese)
- [14] CHEUNG Y M, LIU H. A new approach to blind source separation with global optimal property [J]. Faculty Research Grant of Hong Kong Baptist University with Project Number: FRG/01-02/II-24.
- [15] 张小兵, 马建仓, 陈翠华, 等. 基于最大信噪比的盲源分离算法[J]. 计算机仿真, 2006, 23(10): 72-75.
- MA Xiaobing, MA Jianchang, CHENG Cuihua, et al. A blind source separation algorithm based on maximum signal noise ratio [J]. Computer Simulation, 2006, 23(10): 72-75. (in Chinese)

- [16] MA Jianchang, ZHANG Xiaobing. Blind source separation algorithm based on maximum signal noise ratio [C]// First International Conference on Intelligent Networks and Intelligent Systems, 2008: 625-629.
- [17] BORGA M. Learning Multidimensional Signal Processing[M]. Linkoping: Linkoping University, 1998.
- [18] WAX M, KAILATH T. Detection of signals by information theoretic criteria[J]. IEEE Trans ASSP, 1985, 33(2): 387-392.
- [19] ZHAO L C, KRISHNAIAH P R, BAI Z D. On detection of the number of signals in presence of white noise[J]. Multivariate Anal, 1986, 20(1):1-25.
- [20] WONG K M, ZHANG Q T, REILLY J P. On information theoretic criteria for determining the number of signals in high Resolution array processing[J]. IEEE Trans ASSP, 1990, 38(11):1959-1971.
- [21] FISHER E, MESSER H. Order statistics approach for determining the number of sources using an array of sensors[J]. IEEE Signal Processing Letters, 1999, 6(7):179-182.
- [22] FISHER E, MESSER H. On the use of order statistics for improved detection of signals by the MDL criterion[J]. IEEE Trans SP, 2000, 48(8): 2242-2247.
- [23] BACH F R, JORDAN M I. Kernel independent component analysis[J]. Journal of Machine Learning Research, 2002, 3: 1248.

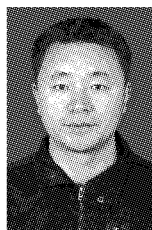
作者简介



杨保平 (1970—),男,河南人,高级工程师,博士生,主要研究方向为通信与信息系统、通信对抗。



陈永光 (1962—),男,安徽人,研究员,博士生导师,新世纪百千万人才工程国家级人选,享受政府特殊津贴,主要研究方向为强电磁场环境模拟与防护技术、电子战作战效能评估技术等。



孙光 (1974—),男,吉林人,高级工程师,硕士研究生,主要研究方向为无线信道仿真、通信对抗仿真。

~~~~~  
(上接第 785 页)



贾娜 (1988—),女,安徽人,硕士研究生,主要研究方向为无线移动通信技术及网络编码等。