

文章编号: 1672-2892(2010)04-0425-06

宽带数字信号处理及其在电子战中的应用

甘建超¹, 邹菊红²

(1.中国电子科技集团公司 第29研究所, 四川 成都 610036; 2.四川省水利职业技术学院, 四川 都江堰 611830)

摘要: 宽带数字信号处理是电子战研究的主题之一。相对于窄带而言, 宽带会导致数字动态、灵敏度、多信号处理等变差。针对这些问题, 结合现代先进的电子技术, 介绍了宽带数字信号处理中的宽带采集、阵列处理、数字信道化以及数字储频干扰等技术, 分析了宽带对这些技术的影响, 探讨了宽带数字信号处理技术在电子战中的应用及发展方向, 为研究数字信号处理技术的工程师提供有益的参考。

关键词: 宽带; 数字信号处理; 数字波束形成; 电子对抗; 数字信道化

中图分类号: TN911.7

文献标识码: A

Wide-band digital signal processing with application in electronic warfare

GAN Jian-chao¹, ZOU Ju-hong²

(1.Southwest China Research Institute of Electronic Equipment, Chengdu Sichuan 610036, China;

2.Sichuan Water Conservancy Vocational College, Dujiangyan Sichuan 611830, China)

Abstract: Wide-band signal processing is one of the topics in electronic warfare. In contrast to narrowband signal processing, wideband signal processing can result in the worsening of digital range, sensitivity and multiple signals processing, etc. To tackle these problems, this paper introduces some modern advanced electron technologies, including wideband sampling, array processing, digital channelizing, and jamming based on the digital radio frequency memory etc. in wideband digital signal processing, and analyses the effects of bandwidth on these technologies. It discusses the applications and the development trends of the technologies in electronic warfare. It is expected that the topic could provide useful reference for engineers engaging in the digital signal processing.

Key words: wide-band; digital signal processing; digital beamforming; electronic warfare; digital channelizing

数字信号处理具有可重复、灵活与稳定特点, 是现代信号处理的重要研究方向, 目前在雷达、通信、电子战和遥控遥测等领域已有广泛应用。随着现代战争的发展, 世界上军事强国相继组建“数字化”部队或装备数字作战武器, 并在近期几次局部战争中发挥重要作用。电子战中的数字信号处理要求拥有宽的瞬时输入带宽, 以便覆盖尽可能宽的频域范围来满足其使用要求。另外, 雷达信号带宽也可能很大(如地基雷达信号带宽超过 1 200 MHz), 这也对数字信号处理带宽提出了要求。带宽有 2 种涵义: 一种是指相对带宽, 指的是信号带宽与中心频率之比在 25%以上, 雷达界或天线领域多用这种宽带; 另一种是指绝对带宽, 但没有明确的界限, 百兆赫兹量级就可以算得上宽带, 电子对抗领域多用这种宽带。电子战中, 目前应用最多的还是窄带数字信号处理, 其带宽通常为几十兆或者更小。窄带数字信号处理容易实时实现, 与之不同的是, 宽带数字信号处理中数据存储、传输及实时处理的压力非常大, 本文重点分析电子战中宽带数字信号处理。

1 宽带数字信号处理

宽带数字信号处理^[1-3]主要包含宽带采集和采集数据的处理 2 个部分。宽带采集是宽带数字信号处理的必要过程, 是后续数字信号处理必须经过的阶段。采集数据的处理能够实现多种功能, 下面主要从数字天线、数字侦察和数字干扰几个方面进行分析。

1.1 宽带采集技术

宽带采集^[4-6]是在中频附近对输入信号进行数字量化,通常采用模数变换器(ADC)来实现。奈奎斯特采样定理表明,为了避免信号产生频率折叠模糊而失真,ADC的输入带宽必须小于1/2采样频率。工程上采样频率通常设置为输入带宽的2.2~2.5倍。如果增加ADC的采样频率,则可提高数字系统的瞬时输入带宽。

宽带采集有3种方式:第1种是高速ADC采样;第2种是示波器采样;第3种是光采样。高速ADC采样技术通过并行的若干个比较器对输入信号进行离散化,ADC位数 b 与比较器个数 N 的关系是 $N=2^b$ 。为了降低硬件实现难度,可采用级联方式来获得ADC大的位数。如8位ADC需要256个比较器,但通过2个4位ADC级联产生8位ADC,则比较器减为32个(2×16)。一般情况下,低速率采样的位数比高速率采样更容易实现。随着采样频率和位数增加,其硬件实现难度将越来越大。目前,美国国家半导体公司已有8位3 Gsps的ADC产品,泰克公司已经开发了8位12.5 Gsps的ADC。示波器采样主要有2种方式:一种是利用延迟线并联几路ADC来实现大带宽采样,如泰克公司最近推出的示波器新产品利用4个8位12.5 Gsps的ADC并行实现50 Gsps的采样;另一种是对复制的周期信号选用不同的延迟时间实现高速率采样。光采样是通过光电转换,利用持续时间非常短的光脉冲与信号相乘,取出每个光脉冲对应的信号幅度,从而实现大带宽采样,资料记载已有8位40 Gsps的光ADC出现,是利用4个8位10 Gsps的光ADC并行实现的。

宽带采集使得数字量化位数难以做到很大。如果宽带采集的位数变少,则数字系统的动态范围将变小,数字域上的信噪比也变小。动态范围主要由采样位数 b 决定,其功率表达式为 $(2^b)^2$,写成分贝的形式为 $6b(\text{dB})$,这个值在一定程度上反映了信号功率的变化范围,即数字量化后动态范围的dB形式为 $DR=6b$ 。

对于8 bit的高速采样,理论上可以得到48 dB的动态范围。另外,数字量化值与真实值之间存在一个差值,将其当作量化噪声,则 b 位量化得到的数字域信噪比(dB)为:

$$R_{\text{SN}}=6.02b+1.72 \quad (1)$$

如果将这个量化差值看作数字域上的噪声基底,则 b 位数字信号的有效位数将小于 b 位。根据式(1)可以计算数字量化的有效位数:

$$b_{\text{eff}} = \frac{R_{\text{SN}} - 1.72}{6.02} \quad (2)$$

宽带采集带来的必然问题是大容量数据处理存储、传输及实时处理难。带宽越大,需要的采样速率就越高,相同时间内获取的数据也就越多。有2种方式处理这些数据:一种是先存储再处理,另一种是不存储就直接处理。前者要求系统存储深度足够大,以适应后续信号处理的需要,这会增加硬件成本和设计难度。后者要求数字信号处理速度跟上采样速率,即某个时间段采集到的数据处理时间必须小于这个采集时间,这种处理方式称为实时处理。对于宽带采集,带宽越大,单位时间内采集数据越多,实时处理压力也就越大。实时处理的方法主要有2种:一种是开发硬件,提高硬件处理速度;另一种是开发实时信号处理算法,缩短信号处理时间。

1.2 宽带数字天线技术

宽带数字天线^[7]是利用AD后的数据实现大带宽的天线功能,并根据需要灵活地形成各种方向图,如零点、超低旁瓣、同时多波束等,如图1所示。这种宽带数字天线由空间上某种阵列形式布置的宽带数字系统综合形成,不仅与信号绝对带宽有关,也与相对带宽有关。下面以图1所示的线性阵列为例分析相对带宽对数字天线的影

1.2.1 相对带宽对数字波束宽度的影响

假设射频为 f_0 ,对于能量为 E 的 θ 方向入射信号, N 个阵元的矢量和为:

$$E(\theta) = \sum_{k=0}^{N-1} E e^{j \frac{2\pi dk \sin \theta}{\lambda}} = E \sum_{k=0}^{N-1} e^{j \frac{2\pi dk \sin \theta}{\lambda}} = E \frac{e^{j \frac{2\pi dN \sin \theta}{\lambda}} - 1}{e^{j \frac{2\pi d \sin \theta}{\lambda}} - 1} \quad (3)$$

式中: d 表示阵元间距; λ 表示信号波长。

如果 $\theta=0$,则频域数据能够同相叠加而取得最大值。

如果 $\theta \neq 0$,则可以得到数字波束方向图:

$$F(\theta) = \frac{|E(\theta)|}{|E_{\text{max}}(\theta)|} = \frac{\sin\left(\frac{\pi dN \sin \theta}{\lambda}\right)}{N \sin\left(\frac{\pi d \sin \theta}{\lambda}\right)} \quad (4)$$

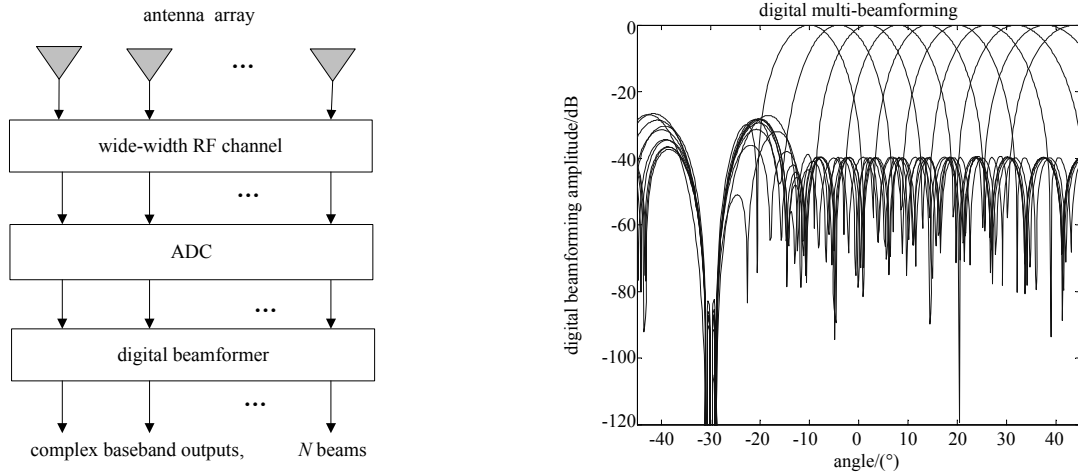


Fig.1 Linear antenna array processing and multi-beam pattern

图1 线性阵列处理及多波束方向图

数字波束方向图的半功率主瓣宽度为：

$$\theta_{0.5} = \frac{50.8c}{dNf_0} \tag{5}$$

对上式求微分，可以得到：

$$\delta\theta_{0.5} = -\frac{\delta f}{f_0} \theta_{0.5} \tag{6}$$

式中： c 表示光速， δf 表示信号带宽。

式(6)说明，信号相对带宽 $\delta f / f_0$ 变化导致数字波束宽度改变，这会使得收到的信号失真。解决这个问题的方法是在数字域上进行恒定波束宽度设计。

1.2.2 相对带宽对数字波束方向的影响

假设波束方向为 θ ，于是相邻阵元天线之间的移相量为：

$$\phi = \frac{2\pi d}{c} f_0 \sin \theta \tag{7}$$

对上式求微分，可以得到：

$$\delta\phi = \frac{2\pi d}{c} (\delta f \sin \theta + f_0 \cos \theta \delta\theta) \tag{8}$$

由于阵列天线的物理结构决定了相邻阵元天线间的相移不变，即 $\delta\phi = 0$ ，故

$$\delta\theta = -\frac{\delta f}{f_0} \tan \theta \tag{9}$$

式(9)说明，信号相对带宽 $\delta f / f_0$ 变化导致波束方向改变，其大小与相对带宽成正比。

数字域上的恒定波束宽度设计技术不仅可以使数字波束方向图的半功率主瓣宽度在不同频率处保持一致，而且可以使波束指向在不同频率处尽可能保持一致，从而减少相对带宽对波束方向的影响。

1.2.3 相对带宽与栅瓣、互耦

工程应用中，阵列数字天线在空间上的位置相对不变。由于宽带原因，固定的阵元间距可能产生栅瓣与互耦的矛盾。如果阵元间距参照较高频率波长设置，则各个天线单元之间因距离较近可能出现互耦，这将导致数字波束发生畸变。如果阵元间距参照较低频率波长设置，则会导致数字波束出现栅瓣，这种虚假数字波束方向图会误导侦察结果。栅瓣与互耦的矛盾难以调和，要么出现栅瓣，要么出现互耦。栅瓣出现位置由式(10)确定：

$$\sin \theta = \sin \theta_b \pm k\lambda / d \tag{10}$$

式中： θ_b 为波束指向； λ 为工作波长； $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ 。如果能降低监视空域范围的要求，则可以通过合理的设计，兼顾栅瓣与互耦的指标。

1.3 宽带数字侦收技术

宽带数字侦收就是对 AD 后的数据或来自数字天线的数据进行处理,产生雷达信号的脉冲描述字,然后根据脉冲描述字完成信号分选。宽带数字侦收具有高密度信号处理能力和处理同时到达信号的能力,能够保留较多雷达信号脉内信息,可以采用灵活的数字处理方法提取雷达特征参数,如载波频率、脉冲幅度、脉冲宽度、脉内信息和脉冲到达时间等。

宽带数字侦收的主要目标是(准)实时处理输入数据,数据处理算法的计算速度非常重要。通过算法提高数据处理速度的方法主要有: a) 将大数据率转换为小数据率,如数字信道化等; b) 数字信号处理算法的快速化,如快速 FFT 等。对于数字信道化(如图 2 所示),如果信道个数为 M ,则每个子信道的数据率降为原来的 $1/M$,这将为(准)实时处理输入数据提供充分的计算时间,但是,如果各个信道都需要关注,则需要并行处理各个信道,这将增加硬件的设计难度。实际应用中,可以将整个接收带宽内的信号通过编码折合到部分信道内而不必关注所有信道。对于 N 点 FFT,其运算量可以将离散 FFT 的 N^2 次复数乘法减少到 $(N/2)\log_2 N$ 次,这使得在 N 较大时运算速度显著提高。

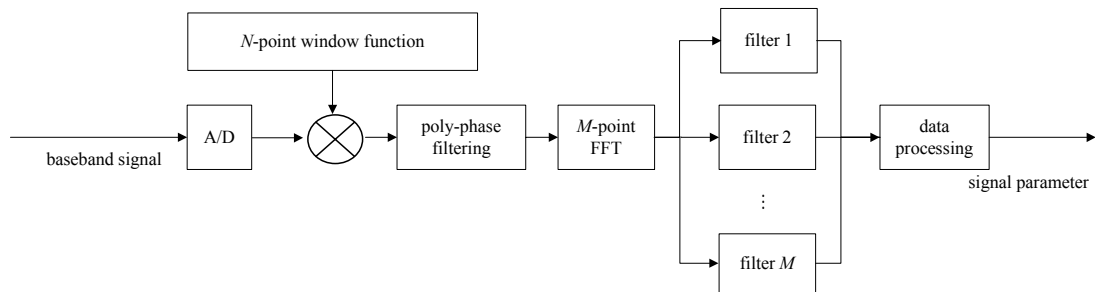


Fig.2 Block diagram of the wide-band digital channelizer

图 2 宽带数字信道化的框图

1.4 宽带数字射频存储技术

对相参雷达进行数字存储干扰时,如果不能保存信号在频域内的全部信息,则不能精确进行复制,难以实现高效干扰。宽带数字射频(Radio Frequency, RF)存储器能够保存信号在频域内的全部信息,其基本工作原理如图 3 所示。首先将输入射频下变频为中频信号,经高速 A/D 变换为数字信号,写入高速存储器中并进行干扰调制。当需要重发这一信号时,在控制器控制下读出此数字信号并由高速 D/A 变换为模拟信号,然后用同一本振作上变频,得到射频输出信号,完成对输入信号的存储转发。

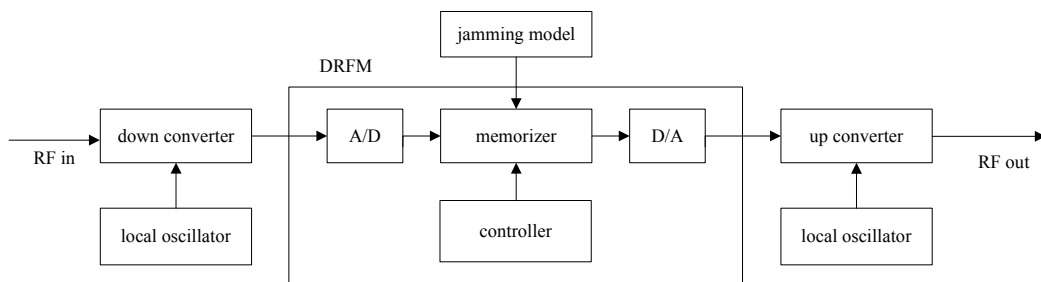


Fig.3 Block diagram of the generating process of the jamming signal based on DRFM

图 3 宽带数字射频存储干扰信号产生的框图

宽带数字射频存储(Digital Radio Frequency Memory, DRFM)可以根据需要对存储下来的数据进行干扰调制,将调制后的数据通过高速 DA 变换为模拟干扰信号,以便实现距离波门拖引、速度波门拖引、假目标欺骗等干扰功能。为了实现宽带雷达的高效干扰,其瞬时带宽应该不小于雷达信号带宽。瞬时带宽确定 DRFM 必须工作的 ADC 和 DAC 速率,其速率越高,存储器的存储要求越高,因而体积、功耗越大,且成本也越高。

2 宽带数字信号处理在电子战中的应用

对于雷达,宽带可改善距离分辨;对于通信,宽带可以增加传输信息容量;对于电子战,宽带可以获得许多好处,在电子支援和电子对抗等方面具有重要作用。

2.1 实现大视角、大带宽的高概率侦收

电子战侦察接收机具有空域和频域宽的特点。为了提高截获概率,电子侦察系统要求瞬时监视的频域和空域范围尽可能宽^[8],重点关注的频率范围是2 GHz~18 GHz。对于数字侦察系统,目前没有合适的ADC能够覆盖这个频率范围,通用的办法是将2 GHz~18 GHz的频率范围划分为若干个子频段,然后变换到统一的中频输出,以时分方式适应整个频率范围。如果中频带宽尽可能宽,就能以较快速度处理完整个输入频段。通过这种宽带数字处理方式,可以提高雷达信号截获概率。

2.2 提高侦察系统灵敏度,实现微弱信号侦收

电子战宽带数字信号处理中,宽带与灵敏度存在矛盾。灵敏度计算公式如下:

$$P = -114 + F + \lg B + D \quad (11)$$

式中: F 为噪声系数; B 为接收带宽; D 为识别系数。显然,在其它参数不变条件下,带宽的增大,意味着灵敏度降低。在接收带宽不变条件下,提高灵敏度的办法主要有2种:一种是减少噪声系数,另一种是降低识别系数。前者可挖掘的潜力不大,于是,提高灵敏度的办法主要是降低识别系数,即提高数字信号处理增益。

宽带数字天线可以获得空间增益,这个增益与带宽没有必然联系,但数字信道化获得的增益与带宽有关。假设输入信号带宽小于单个信道,且处于某个信道内,则经过数字信道化后,信号功率不变,而每个信道内的噪声功率为输入功率的 $1/M$ (M 为信道数目)。因此,数字信道化后信号处理增益理论值为 M 。实际上,1个信号可能在附近2个或3个相邻信道出现,输入信号能量被分散,最多损失三分之二。因此,用分贝表示的信号处理增益在 $-5 + \lg M \sim \lg M$ 之间。信号处理增益的获得,可以提高系统灵敏度,实现微弱信号侦收,这将有利于实现雷达旁瓣信号侦收,也有利于远距离侦察。

2.3 扩展数字干扰机带宽,实现宽带雷达的全带宽匹配干扰

宽带雷达数字干扰波形产生的难点是如何产生全带宽匹配的干扰信号以实现高效干扰。扩展数字干扰机带宽,意味着能够复制更大带宽的雷达信号,对宽带雷达就能够进行理想的欺骗干扰。

如果储频带宽小于雷达信号带宽,则不仅可能影响干扰得益,而且也使得雷达匹配滤波后的干扰脉冲被展宽,欺骗干扰容易被识破。因此,宽带储频技术有利于实现宽带雷达的高效干扰。

3 发展趋势

宽带数字信号处理在电子战中应用越来越广泛,将来可能在以下几个方面成为发展方向,在海、陆、空、天等信息对抗领域具有重要的应用前景。

3.1 光信号处理方向

为了解决宽带与数据存储、传输及实时处理的矛盾,基于电光转换的信号处理是一个非常有发展前途的研究方向。光信号处理适应的瞬时带宽很宽,处理速度非常快,如FFT可以通过一个透镜实现,计算时间可以忽略不计。目前,以色列和美国已经开发出光处理器,其运算速度比数字信号处理芯片快几个量级以上。

3.2 宽带阵列信号处理方向

宽带阵列信号处理在一定程度上能适应复杂电磁环境。通过宽带阵列信号处理,可以将来自不同方向的辐射源信号在空域分开,同时灵活地抑制不感兴趣的信号。这不仅使得后续信号处理或信号分选简单化,且能处理同时到达信号,对复杂电磁环境适应性能也非常好。

4 结论

宽带数字信号处理是电子战中重要的研究内容。本文从宽带信号采集、宽带数字天线、宽带信号侦收、宽带信号储频等方面进行了分析,对其中的关键技术和发展趋势进行了论述。希望本文的内容能为工程应用提供必要的参考。

参考文献:

- [1] Chen C-I H, George K, Wang M, et al. 2.5 GSPS/1 GHz wide band digital receiver[C]// Proceeding of Industrial Electronics

- Society, IECON'2003. The 29th Annual Conference of the IEEE, Roanoke, Virginia, USA: [s.n.], 2003:1888-1893.
- [2] Atlas L, Duhamel P. Recent developments in the core of digital signal processing[J]. Signal Processing Magazine, 1999, 16(1):16-31.
- [3] Mitra S K. Digital Signal Processing: Road to the Future[C]// The International Conference on Computer as a Tool, EUROCON 2005. Belgrade: [s.n.], 2005:2-10.
- [4] James Tsui. 宽带数字接收机[M]. 杨小牛, 陆安南, 金飏, 译. 北京: 电子工业出版社, 2002. (James Tsui. Wideband Digital Receiver[M]. Yang Xiao-niu, Lu An-nan, Jin-Biao, translate. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002.)
- [5] 徐海源, 周一宇, 冯道旺. 滑动 DFT 在宽带数字接收机中的应用[J]. 现代雷达, 2007, 29(9):92-94. (Xu Hai-yuan, Zhou Yi-yu, Feng Dao-wang. Application of Sliding DFT in Digital Wideband Receivers[J]. Modern Radar, 2007, 29(9):92-94.)
- [6] 董晖, 姜秋喜, 毕大平. 多相滤波宽带信道化数字接收机[J]. 雷达科学与技术, 2007, 5(1):73-77. (Dong Hui, Jiang Qin-xi, Bi Da-ping. Polyphase Filtering Wide-Band Channelized Digital Receiver[J]. Radar Science and Technology, 2007, 5(1):73-77.)
- [7] 张光义. 相控阵雷达系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 1994. (Zhang Guang-yi. Phased Array Radar System[M]. Beijing: National Defense Industry Publishing house, 1994.)
- [8] 肖先赐. 宽带电子侦察系统的实时处理问题[J]. 电子对抗技术, 2004, 19(3):1-6. (Xiao Xian-ci. Real Time Implementation Issue in Wide Band Electronic Reconnaissance Systems[J]. Electronic Warfare Technology, 2004, 19(3):1-6.)

作者简介:



甘建超(1968-), 男, 成都市人, 博士, 主要研究方向为现代信号处理. email: ganjc7869@sina.com.

邹红菊(1976-), 女, 四川省都江堰市人, 讲师, 主要从事计算机应用技术研究.

四川省电子学会曙光分会第十五届学术年会暨第四届全国信息与电子工程学术交流会第2轮征文通知

由四川省电子学会和四川省电子学会曙光分会、中国工程物理研究院科协主办, 中国工程物理研究院电子工程研究所科协和《信息与电子工程》编辑部承办的第四届“全国信息与电子工程学术交流会”, 预定在 2010 年 10 月 13~18 日在福建省厦门市召开。学术会议内容包括: 大会特邀学术报告、小组学术交流、参观附近名胜等。会议期间还将召开《信息与电子工程》第四届编委会全体会议, 其内容包括听取编辑部工作汇报及商讨办刊有关事宜。欢迎国内同行专家、高等院校师生及科研院所广大科技人员和《信息与电子工程》编委会全体成员积极撰稿、撰稿并光临会议。

收稿截止日期延期至 2010 年 9 月 1 日(以当日邮戳为准)。所有来稿均将转送会议筹备组聘请的同行专家审阅, 未录用稿件, 请作者自行处理, 原稿一律不退。凡会议评出的优秀论文经作者同意后将推荐到中国科技核心期刊《信息与电子工程》或其它电子类公开刊物发表。作者来稿应附上本人姓名、职称、所在单位、通信地址、邮编、电话、传真、email 等, 以便联络, 并提交打印稿 1 份和软盘 1 张或直接发电子邮件。

来稿请附作者简介, 格式为: 姓名、出生年月、性别、籍贯或出生地、职称或学位、大学毕业时间、毕业学校和专业、最后学历、所从事科技工作领域或研究方向、主要著作及获奖情况等。

联系人: 程英 罗雪梅

通信地址: 四川省绵阳市 919 信箱 532 分箱, 621900

联系电话: 0816-2495779 13608129237(程), 0816-2487503(罗)

传真: 0816-2487594

E-mail: chengying090900@sina.com(程)

主办单位: 四川省电子学会、四川省电子学会曙光分会、中物院科协

承办单位: 中物院电子工程研究所科学技术协会、《信息与电子工程》编辑部