

基于 Compressed Sensing 框架的图像多描述编码方法

刘丹华¹, 石光明¹, 周佳社¹, 高大化^{1,2}, 吴家骥¹

(1. 西安电子科技大学 智能感知与图像理解教育部重点实验室, 陕西 西安 710071;

2. 空军工程大学 理学院, 陕西 西安 710051)

摘要: 基于新兴的压缩感知 (Compressed Sensing, CS) 理论, 提出了一种抗丢包能力强且结构简单易实现的多描述编码方法. 首先对变换后的图像进行交织抽取分块, 再对各子块进行随机观测、量化、打包形成多个描述子码流. 解码端根据接收码流情况通过求解优化问题重建原图像. 由于随机观测过程简单易实现, 故该方法可以以较低的计算复杂度构造出较多的描述子. 实验结果表明, 在同样的丢包率下, 本文方法的重构质量 (PSNR) 明显优于 SPIHT 多描述编码方法, 且计算复杂度较低.

关键词: 多描述编码; 压缩感知; 随机观测; 优化问题

中图分类号: TN911.2 **文献标识码:** A

NEW METHOD OF MULTIPLE DESCRIPTION CODING FOR IMAGE BASED ON COMPRESSED SENSING

LIU Dan-Hua¹, SHI Guang-Ming¹, ZHOU Jia-She¹, GAO Da-Hua^{1,2}, WU Jia-Ji¹

(1. Key Lab of Intelligent Perception and Image Understanding of Ministry of Education,

Xi'dian University, Xi'an 710071, China;

2. School of Science, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: Based on compressed sensing (CS), a new multiple description coding method (CS-MDC) was presented. The new method is robust to packet loss or bit error, and has the advantages of simple structure and easy implementation. The method partitioned an image into several blocks by interleaving extracting in the wavelet domain, and made random measurements of the image blocks, and then formed multiple descriptions after quantizing and packing. At the decoding end, it reconstructed the original image approximately or exactly with the received bit streams by solving an optimization problem. The proposed method can construct more descriptions with lower complexity because the process of random measuring is simple and easy to realize. Experimental results show that the proposed method exhibits its superiority over SPIHT-MDC with the same packet loss probability, and it can easily generate more descriptions.

Key words: multiple description coding; compressed sensing; random measurement; optimization problem

引言

随着无线通信和多媒体技术的发展, 图像与视频信号在网络中的高质量传输变得越来越重要. 多描述编码^[1] (Multiple Description Coding, MDC) 作为一种针对不可靠网络传送的信息编码方式受到了国内外广泛的关注, 成为众多学者研究的热点.

目前多描述编码技术主要有四大类: (1) 基于时/空域或变换域的亚采样 MDC^[2]; (2) 多描述量化编码 (MDQ)^[3,4]; (3) 多描述变换编码^[5]; (4) 基于

FEC 的多描述编码^[6]. 简单的亚采样 MDC 方法编码器简单但性能较差, 且随着描述个数 J 的增加性能更加恶化. MDQ 和相关变换方法实现简单, 但随着描述个数 J 的增加计算复杂度急剧增加. 基于 PET (Priority Encoding Transmission) 的 MDC 方法^[7] 能够提供较精细的描述粒度, 并且能产生较多的描述子. 但是它们要求信源的码流可分级, 且需要前向纠错编码 (如 Reed-Solomon 码) 加以保护. 因此, PET-MDC 由于具有较高的计算复杂度而不适用于计算资源有限的网络. 综上所述, 现有多描述编码方

收稿日期: 2008-08-11, 修回日期: 2009-02-26

Received date: 2008-08-11, revised date: 2009-02-26

基金项目: 863 计划 (2007AA01Z307)、国家自然科学基金 (60776795, 60736043, 60672125, 60607010) 和教育部长江学者和创新团队支持计划 (IRT0645) 资助项目

作者简介: 刘丹华 (1978-), 女, 河南周口人, 讲师, 博士研究生, 主要从事信息处理、信号和图像稀疏性分析的研究.

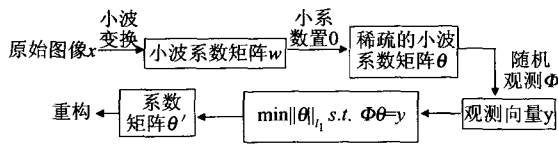


图1 CS理论用于图像处理领域的结构框图

Fig. 1 Structural block diagram of CS applied in image processing field

法存在的问题是:描述个数越多,重构质量越好,抗误码和丢包能力越高,但同时计算复杂度急剧增加,编码效率也随之降低.目前多描述编码方法还停留在理论研究方面,远未达到实际应用的目标.

本文基于压缩感知理论(Compressed sensing, CS)^[8-12],提出一种新的CS-MDC编码方法.该方法不仅可以极大地提高多描述编码的抗丢包能力,而且编码复杂度较低,易于硬件实现.

1 Compressed Sensing 理论框架

CS理论首先由Candès^[8]等人和Donoho^[10]提出.CS理论的主要思想是:假设一长度为 N 的信号 x 在某个正交基或紧框架 Ψ 上的变换系数是稀疏的(即只有少数的非零系数),如果将这些系数投影到另一个与变换基 Ψ 不相关的观测基 $\Phi: M \times N, M \ll N$ 上,得到观测集合 $y: M \times 1$,那么信号 x 可以凭借这些观测值通过求解下面的优化问题(P_1)而精确恢复.CS理论应用于图像处理领域的结构框图如图1所示.

$$P_1: \min \|\Psi^T x\|_1 \quad s.t. \quad \Phi \Psi^T x = y \quad (1)$$

事实上,对于一个 K 项-稀疏($K \ll N$)长度为 N 的信号仅仅需要投影到另一个不相关基上的 $K+1$ 个系数就可以以高概率被重构(文献[11]定理2已证明).然而,这么做需要进行组合搜索,计算复杂度相当高.Candès等人提出一种可行的基于线性规划的重构方法,论证了只使用对信号的 cK ($c=3$ 或者4)个观测值,利用线性规划的方法就可以得到和组合搜索相同的解.另一类基于贪婪思想的迭代算法^[13,14]已被提出,它以更多的观测数量作为代价

达到了更加快速重构的目的.CS理论的引人之处在于它对于应用科学和工程的许多领域具有重要的影响和实践意义,如统计学、信息论、编码理论、计算机科学理论及其它理论^[11].

2 CS-MDC 系统方案

CS-MDC系统框架图如图2所示.具体步骤如下:

1. 对原图像进行小波分解;
2. 将小波系数按某种方式分组,得到子图像;
3. 对各个子图像分别用相同的CS编码器编码,每个码流对应一个描述子,然后经各自的信道传输;
4. 接收端根据接收到的描述子情况选择相应的解码器,例如,存在丢包情况下,接收到 i ($1 \leq i \leq 4$)个完整的描述子,其余描述子全部丢失,则采用 i 描述解码器重构图像;如果各个描述随机丢包,即4个描述子中若全部或者个别描述子存在丢包现象,则选择4描述解码器重构图像.

CS重构误差大小只与重构使用的观测值个数有关,而与具体的某个观测值几乎无关.即每一个观测值对信号重构的贡献是一样的.这一特性恰好符合多描述编码的需要.CS-MDC相比传统多描述方法具有如下优点:(1)编码器简单.一次简单的观测就可以产生一个描述,产生 $J \geq 2$ 个描述仅需要 J 次随机观测,无需前向纠错编码.(2)抗丢包能力进一步增强.CS重构图像/信号的质量仅依赖于接收到的观测值数目,与具体接收到的是哪些观测值无关,因此容易做到均衡式MDC.(3)编码效率进一步提高,因为CS-MDC不需要对位置信息进行编码.

2.1 小波域图像分割

本文基于“交织抽取”的方法对图像在小波域进行分割.以2级小波分解,4描述为例,图像分割过程如图3所示.

2.2 CS-MDC 编码器

CS-MDC编码端框图如图4所示.首先对各个

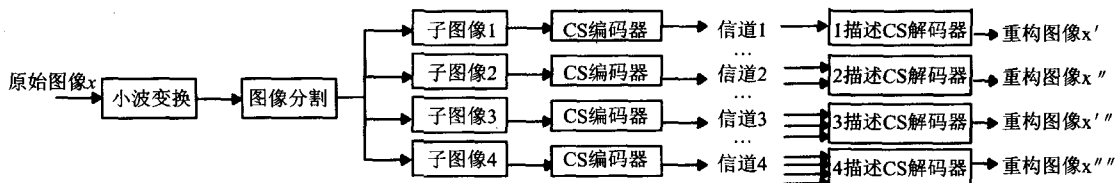


图2 CS-MDC系统框图

Fig. 2 System diagram of CS-MDC

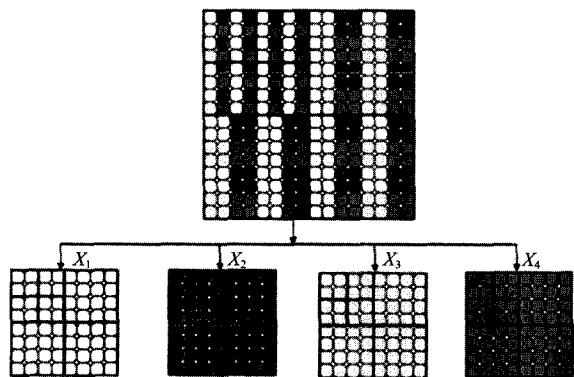


图3 基于交织抽取的子图像划分过程
Fig.3 Image division process by interleaving extraction

小波域子图像进行随机观测、量化,分别打包形成4个码流的描述子,最后通过4个信道传输到解码端.

稀疏变换:稀疏是保证CS理论高概率精确重构的前提条件,事实上自然图像很难找到一个严格稀疏的变换域,我们可以通过舍弃小系数的方式达到稀疏的目的,这样做自然会损失一些图像信息,但由于舍弃的系数数值非常的小不影响图像的视觉效果.

观测过程:利用 $M \times N$ 观测矩阵 Φ 的 M 个行向量 $\{\phi_j\}_{j=1}^M$ 对稀疏向量 θ 进行观测,得到 M 个观测值 $y_j = \langle \theta, \phi_j \rangle$ ($j=1, 2, \dots, M$). 记观测值向量 $y = (y_1, y_2, \dots, y_M)$, 于是 $y = \Phi\theta = \Phi\Psi^T x$. Candès^[11] 等人指出要想使信号完全重构,必须保证观测矩阵不会把两个不同的稀疏信号映射到同样的采样集合中,即,要求观测矩阵和变换基不相关. 本文方案里选择随机矩阵作为观测矩阵,这是由于随机矩阵和大多数固定基以高概率不相关. 随机矩阵产生非常简单,这也给编码器的设计带来方便. 我们在设计CS-MDC编/解码器时,可以分别在两端固定一个产生随机矩阵的种子,就能保证在编码端观测和解码端重构时采用的是同一个观测矩阵,保证了重构的信号就是原信号. 需要指出的是, Φ 的设计是独立于信号 x 的. 在满足 Φ 和 Ψ 不相关要求后就可以从观测值中利用凸优化算法实现重构.

量化过程:本文方案中的量化器采用均匀量化器实现,均匀量化的好处就是编解码算法简单,有利于简化CS-MDC编解码.

从图4可看出,CS-MDC编码端只需要随机观测、量化、打包就可生成多个描述子,且不需要对观测值的位置信息进行编码,因此编码器设计复杂度较低. 在出现丢包情况时,CS-MDC解码器只丢弃该包而不是丢弃后续所有包甚至整个描述,且重构质量仅和正确接收到的观测值个数有关,因此在丢包不严重的情况下,丢包对解码端重构图像的影响不大,在不可靠信道传输时CS-MDC方法比传统多描述方法更可靠.

2.3 CS-MDC 解码器

根据前面所述,编码端发送的多描述码流是用CS的方法随机观测后量化打包的数据码流. 那么在解码端我们采用CS理论中的重构方法去指导解码器的设计,于是解码的本质问题就归结为求解 l_1 范数最小化的优化问题. 而解码器设计的核心内容则是设计快速重构算法. 本文目的在于介绍一种将CS理论应用于多描述编码的新方法,至于重构算法的设计可以参考相关文献[13, 14], 本文综合考虑后采用STOMP(Stagewise Orthogonal Matching Pursuit)算法对本文方法进行了仿真实验验证. 具体解码过程如图5所示. 解码端将接收的码流首先进行解包、逆量化处理,并重新组合成观测向量 y' . 然后根据 y' 通过求解优化问题(P_1)重构出系数矩阵 θ' , 将 θ' 反变换后重构出原图像的逼近 x' .

3 仿真实验及结果分析

选用标准灰度Lena图像(256 * 256, 8bit)对本文方法进行Matlab仿真实验. 实验中采用的变换基为9/7双正交小波基,分解级数为5级,4个描述,压缩码率为1.0bpp. 重建算法采用STOMP,仿真结果如图6所示.

图7是CS-MDC在各种码率下的抗丢包性能仿

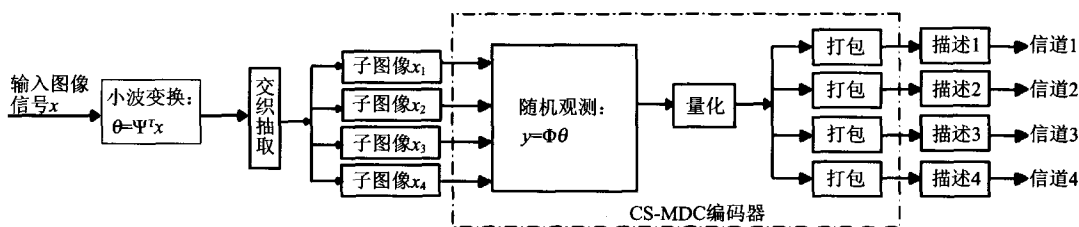


图4 CS-MDC编码过程
Fig.4 Coding process of CS-MDC

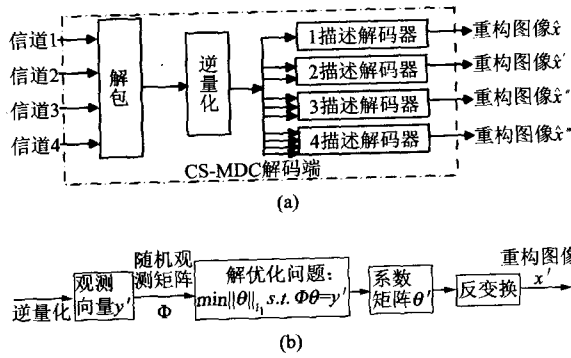


图5 CS-MDC 解码端 (a)CS-MDC 解码过程 (b)CS-MDC 解码器
Fig. 5 System diagram at the decoding end of CS-MDC (a) decoding process of CS-MDC (b) decoder of CS-MDC

真实实验结果. 对于固定码率, 当丢包率小于某个门槛时, 获得的有效数据是稀疏数据的 3 ~ 5 倍, 根据 CS 相关理论, 此时可精确重构图像. 在这个范围内, 丢包几乎不影响重构, 抗丢包性能很强. 例如, 对于 bpp 为 1.0 的情况, 当丢包率达到 15% 时, 仍然可以以较高的 PSNR (PSNR = 34.99dB) 精确重构, 当丢包率超过 15% 时, 丢包率才影响到重构的质量. 显然, 在抗丢包能力方面, 本文方法明显优于非多描述编码方法^[15].

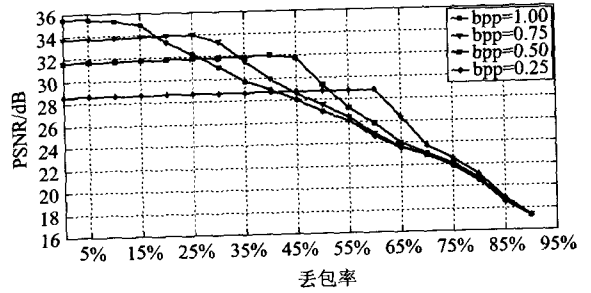


图7 CS-MDC 在各码率下的抗丢包性能对比
Fig. 7 Comparison of robustness to packet loss under different bit rates

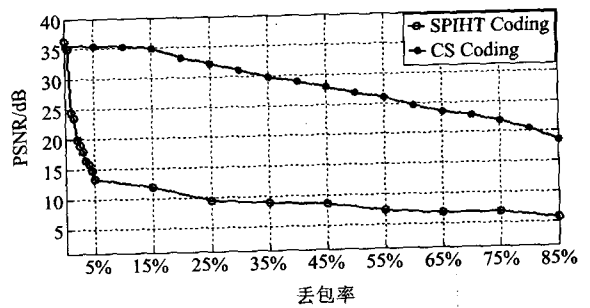


图8 本文编码方法和 SPIHT 编码方法抗丢包性能对比
Fig. 8 Comparison of our method with SPIHT-MDC method in robustness to packet loss

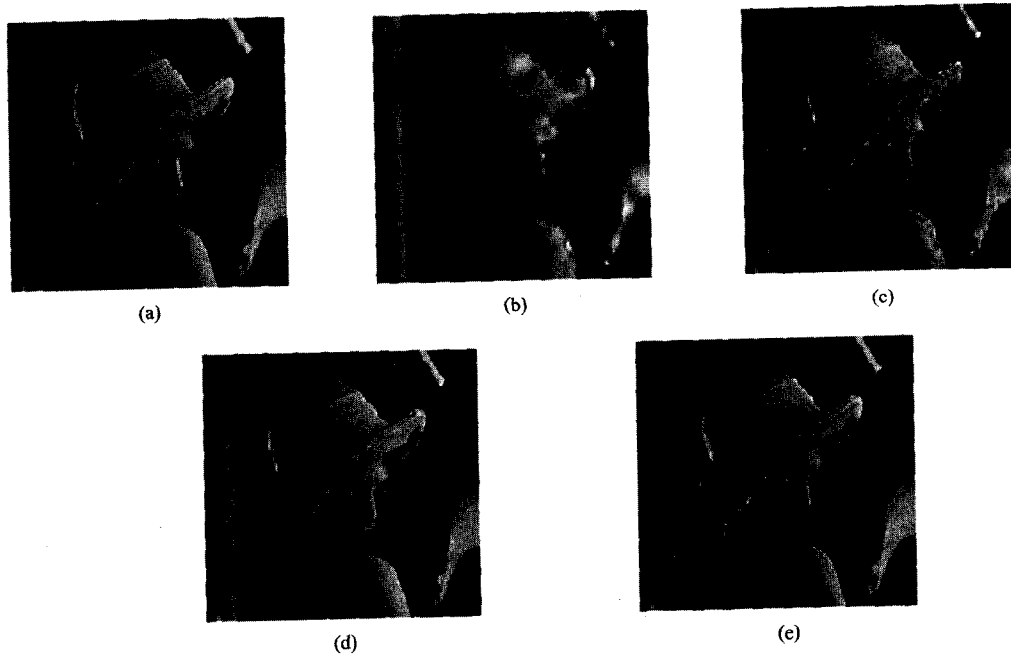


图6 CS-MDC 方法重建 Lena 图像实验结果 (a)原始图像 (b)1 个描述重建图像 (PSNR = 21.89dB) (c)2 个描述重建图像 (PSNR = 26.96dB) (d)3 个描述重建图像 (PSNR = 31.93dB) (e)4 个描述重建图像 (PSNR = 35.55dB)
Fig. 6 Recovery results of the Lena image based on CS-MDC (a)original image (b)recovered image with one description (PSNR = 21.89dB) (c)recovered image with two descriptions (PSNR = 26.96dB) (d)recovered image with three descriptions (PSNR = 31.93dB) (e)recovered image with four descriptions (PSNR = 35.55dB)

前面提到,自然图像很难找到严格稀疏的变换域,因此大多数情况下,稀疏度通过调整保留大系数的数目来人为控制.当变换基确定后,人为控制的稀疏度越好,即, K 取值越小,完全重构图像所需数据(3~5K)也就越少,则同样量化位数时,码率越小(即压缩比越大),同等丢包率情况下的 PSNR 越小,但抗丢包能力越强,分析原因:为保证更大的稀疏度不得不舍弃更多的系数,这种误差造成 PSNR 变小,由于重构所需观测数目变少又使得抗丢包能力变强;反之,人为控制的稀疏度越差,码率越大,PSNR 越大,但完全重构图像所需数据也就越多,抗丢包能力越差,甚至可能出现高码率时的重构效果反而不好.例如:丢包率为 30% 时,0.5bpp 时的 PSNR 反而优于 1.0bpp 时的 PSNR.这正是由基于 CS 的多描述理论中的重构特性决定的.

图 8 是本文方法和 SPIHT (Set Partitioning in Hierarchical Trees) 的多描述编码方法在丢包情况下的实验对比,码率为 1.0bpp.从仿真结果图可以看出,CS-MDC 在抗丢包率性能方面优于 SPIHT-MDC.

CS-MDC 编码器仅通过随机观测、量化、打包即可形成多个描述子,设计和计算复杂度低(编码过程只是矩阵相乘),实现简单. SPIHT-MDC 实现超过 2 个描述的系统时,必须要对码流重新封包,而且每个包必须添加 CRC 校验.因此, SPIHT 编码器设计相对复杂.例如,以 4 描述为例,分别用本文方法和 SPIHT 方法对 256×256 的 Lena 图像进行多描述编码.码率均为 1,在同样的计算平台(Intel 双核 2.53GHz/2G 内存)下,CS 方法产生 4 描述的编码时间为 0.037611s,而 SPIHT-MDC 为 1.944482s,约为 CS 方法的 50 倍.

4 结语

针对传统多描述编码为获得高质量重构所需描述个数增多时编解码复杂度急剧增加的问题,本文提出一种基于 CS-MDC 方法.该方法利用了 CS 理论的直接信息采样特性,在同等丢包率情况下能得到质量更高的重构图像,提高了数据传输的鲁棒性,且编码器设计简单,易于硬件实现. CS-MDC 目前有待进一步解决的问题是,当原始图像尺寸特别巨大(例如, 2048×2048) 时重建计算量大,可以通过对

原始图像进行分块,从而降低计算量.但是,分块越多,速度越快,但 PSNR 越小.这就需要找到平衡点.

REFERENCES

- [1] Goyal V K. Multiple description coding: Compression meets the network[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2001, 18(5):74—93.
- [2] Wang Y, Lin S N. Error-resilient video coding using multiple description motion compensation[J]. *IEEE Trans. Circuits and Systems for Video Technology*, 2002, 12(6):438—452.
- [3] Vaishampayan V A. Design of multiple description scalar quantizers[J]. *IEEE Trans. Inform. Theory*, 1993, 39(3):821—834.
- [4] Fleming M, Effros M. Generalized multiple description vector quantization[C]. Proceedings of the IEEE Data Compression Conference, DCC'99, Snowbird, UT, USA, 29—31 March, 1999:3—12.
- [5] Wang Y, Orchard M T, Vaishampayan V A, et al. Multiple description coding using pairwise correlating transforms[J]. *IEEE Trans. Image Processing*, 2001, 10(3):351—366.
- [6] Puri R, Ramchandran K. Multiple description source coding using forward error correction[C]. The 33rd Asilomar Conference on Signals, Systems and Computer, 1999, 1:342—346.
- [7] Sarshar N, Wu X L. A practical approach to joint network-source coding[C]. Proceedings of the Data Compression Conference (DCC'06), 2006:93—102.
- [8] Candès E J. Compressive sampling[C]. Proceedings of International Congress of Mathematics, 2006, 3:1433—1452.
- [9] Candès E J, Romberg J, Tao T. Robust uncertainty principles: Exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information[J]. *IEEE Trans. on Information Theory*, 2006, 52(2):489—509.
- [10] Donoho D L. Compressed sensing[J]. *IEEE Trans. Information Theory*, 2006, 52(4):1289—1306.
- [11] Baron D, Wakin M B, Duarte M, et al. Distributed compressed sensing[EB/OL]. 2005, <http://dsp.rice.edu/cs/DCS112005.pdf>.
- [12] Baraniuk R. A lecture on compressive sensing[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2007, 24(4):118—121.
- [13] Tropp J A, Gilbert A. Signal recovery from partial information by orthogonal matching pursuit[J]. *IEEE Trans. on Information Theory*, 2007, 53(12):4655—4666.
- [14] Donoho D L, Tsai Y, Drori I, et al. Sparse solution of underdetermined linear equations by stagewise orthogonal matching pursuit[R]. *Technical Report*, 2006.
- [15] GU Wei, HU Bo, LING Xie-Ting, et al. An efficient and robust scheme of image-coding[J]. *J. Infrared Million. Waves* (顾炜, 胡波, 凌燮亭, 等. 一种高效的抗误码能力强的图像编码方案. *红外与毫米波学报*), 2001, 20(3):189—193.