

## 小波编码图像联合信源信道解码算法的研究

张 晔 王 申

(哈尔滨工业大学电子与信息技术研究院 哈尔滨 150001)

**摘 要:** 为提高图像在噪声信道中传输的可靠性, 该文提出了一种图像联合信源信道解码方案。信源图像首先经离散小波变换, 压缩编码。编码数据经 RCPC(率兼容删余卷积码)信道编码保护, 通过噪声信道传输。在接收端的改进的 APRI-SOVA (先验信息软输出维特比算法)在信道解码时, 不仅利用了信道输出的软判决, 而且进一步利用了信源解码器提供的当前解码的比特的可靠性信息。仿真结果显示, 有效利用信源数据中遗留的相关性, 能够实现图像解码质量的提高。

**关键词:** 联合信源信道解码; 离散小波变换; 率兼容删余卷积码; 软输出维特比算法

中图分类号: TN919.8

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)07-1569-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.01145

## Study of Joint Source Channel Decoder for Wavelet Coding Images

Zhang Ye Wang Shen

(School of Electronics and Information Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** A joint source-channel decoding approach is developed to improve the reliability of image transmissions. The source coders used is the discrete wavelet transform coding, and channel coders used is the RCPC (Rate-Compatible Punctured Convolutional) coding. At the receiver, after transmitted through noise channel, a modified APRI-SOVA (a Priori Soft-Output Viterbi Algorithm) is employed which using not only soft output of the channel but reliability of the current bit providing by source decoder. The simulation results show that the approach may be better to exploit the correlation remain in the source data and use it at the receiver side in order to achieve a more reliable decoding.

**Key words:** Joint Source-Channel Decoding(JSCD); Discrete Wavelet Transform(DWT); Rate-Compatible Punctured Convolutional (RCPC); Soft-Output Viterbi Algorithm(SOVA)

### 1 引言

传统的通信系统, 信源与信道通常分别编码。这样的系统首先基于一种假设: 信源可以编码成为不相关的且重要性相同的比特流, 且信道编码及调制系统可以阻止这些比特流在传输时发生错误, 并使之完全无误或近似完全无误地到达信源信号重建的解码端。事实上由于带宽、系统延时及系统复杂度等因素的限制, 实现完美信道编码的代价过于昂贵, 同时由于信源的高度非平稳性, 许多的信源编码方案保留了部分冗余且输出比特具有不同的重要性及不同的错误敏感度, 而这些比特仍然具有很高的相关性。在这样的前提下, 就为联合信源信道的编码及解码提供了可能。近年来, 有许多的研究集中在这个方向上<sup>[1-6]</sup>。

香农在他的文献[7]中提到“如果在接收端可以

被利用的话, 任何信源的冗余通常都会起到一定作用。实际上, 如果信源仍然包含冗余且为了与信道匹配而没有进一步试图消除他们, 那么这些冗余对抵抗噪声会有帮助。”Hagenauer 证明其是可行的<sup>[1]</sup>, 他将这种利用信源冗余的算法归纳为信源控制型解码算法, 并给出了该算法语音编码的几个应用的实例。随后 Xu 又将该算法应用于 DCT 变换与 DPCM 结合的静止图像编码传输<sup>[2]</sup>。这些方法都有效地利用了信源编码的中遗留的冗余信息, 实现了比传统信源与信道分离式编码更佳的性能。但为了提高冗余信息的可靠性, 又需要保留较多的冗余信息, 使得信源编码率不能太低, 限制了实际的应用。

随着小波技术应用到图像编码领域, 涌现出许多新的编码算法, EZW(Embedded Zerotree Wavelet coding), SPIHT(Set Partitioning In Hierarchical Trees)及 EBCOT(Embedded Block Coding with Optimal Truncation)。由于小波系数多分辨率, 多尺度等特性, 这些编码算法逐渐转向

支持嵌入式码流，多分辨率重建等方面。这些新的特性的出现，使得不等错误保护越发重要。这样，在图像传输领域，特别是图像传输的联合信源信道编码领域，许多基于 DCT 编码的方法就不再适用，进而涌现出一些新的方法。Sherwood 和 Zeger 提出了将 SPIHT 信源编码与 RCPC/CRC 信道编码级联的方案<sup>[8]</sup>，RCPC 码用于抵抗噪声，CRC 码用于检测未消除的错误。Tripathi 等又提出利用带反馈机制的 RS(Reed Solomon)码与图像编码器连接，实现多种编码速率选择实现最佳传输<sup>[4]</sup>。Xian 在文献<sup>[5]</sup>中将联合信源信道解码出与信道解调软判决相结合，提高系统纠错能力。这些方法从不同方面实现了联合信源信道的传输方案，但均没有利用到信源中的遗留冗余，特别是小波编码图像的遗留冗余。事实上信源中的未编码冗余与信道解码器结合，可提高信道解码算法的纠错能力。

本文结合小波编码算法中遗留的未编码冗余，提出了基于小波编码图像编码算法的信源控制型联合信源信道解码算法。小波系数经过编码后，未被编码器利用的冗余依然存在很强的相关性，这些相关性在信源解码时，可以用来描述当前解码比特的可靠性数值，而这个可靠性数值与 APRI-SOVA<sup>[9]</sup>信道解码器的软输出值组合，可以更有效地抵抗图像数据在噪声信道上传输而受到的干扰。

## 2 图像编码算法及遗留冗余

由于小波系数的多分辨率结构，描述相同空间位置的小波系数，在同方向低频子带和相邻高频子带之间存在 4 叉树关系，这种树形结构可以有效地描述小波变换域的空频局域特性，因此利用树形结构，可以构成小波编码器，如 EZW 及 SPIHT。同样，由于每个独立的子带，包含了图像某一频带的信息。所以每个子带内的小波系数也存在很强的相关性，利用这些相关同样可以构成高效的编码器，如 EBCOT。编码器如果利用了小波系数的树结构相关性，就无法顾及子带内的相关性，因为子带内的

这种邻近系数的相关性描述，会打乱树结构带来的高效性。同样，一旦编码器利用的子带内的相关性，就无法顾及树结构的相关性。因此这种未被编码器使用的相关性，也就是遗留冗余，就可以在信道解码被利用，提高信道解码器的性能。

以 SPIHT 编码算法为例，图 1(a)为图像两层分解的小波系数的结构图，图 1(b)为对应的小波系数，转换为 8 bit 精度的成像。小波系数共分为 7 个子带。位于每个区域的最小方块代表一个小波系数， $LL_2$  子带的小波系数 4 个为一组代表根节点，除左上角的节点外，分别在  $HL_2$ ， $LH_2$ ， $HH_2$  子带有 4 个为一组的子节点，而  $HL_1$ ， $LH_1$ ， $HH_1$  子带的小波系数 16 个一组为对应的孙节点。这些节点，子节点，孙节点就构成了小波系数的一棵全树。而不同的灰度区域表示两棵不同的树。如图 1(a)，相邻的树，划分了子带的邻近区域。因此，树与树之间就存在子带内的相关。

按照 SPIHT 算法的划分，编码时首先取最大门限值，扫描位于  $LL_2$  子带内的所有节点，当该节点大于门限值时为有效，标记该节点，同时编码该节点的符号。所有节点扫描完毕，扫描对应每个节点的子孙，如果所有子孙均无效，则只需要 1 bit 0 来编码这个子孙的集合，若该集合内有系数大于门限，则将对应的子节点标记为新节点。所有子孙扫描完毕，门限减半，重复扫描过程，前次扫描中，以标记为有效的节点不再扫描，在后面做幅度精细化处理。不断重复这个过程，直到达到所需的编码率。

可以看出，SPIHT 算法的整个编码过程，只是利用了小波系数树结构上的相关性，而没有考虑小波邻近系数的相关性。图 2 表示子带内的小波系数的关系， $X(i, j)$  代表任意位置的系数， $A(i-1, j)$ ， $B(i, j-1)$ ， $D(i-1, j-1)$  代表其相邻的小波系数。由于编码过程中，按照阈值的有效性扫描是按照自左向右，自上向下的顺序，所以， $A$ ， $B$ ， $D$  位置的系数均先于  $X$  编码。同时注意到小波系数不同子带的方向性，如图 2 中虚线箭头所示，那么由  $ABD$

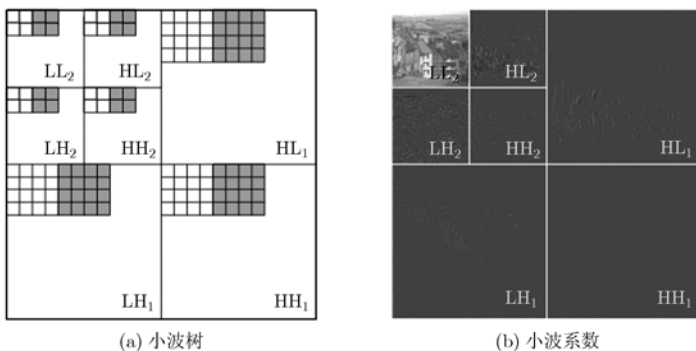


图 1 图像小波系数示意图

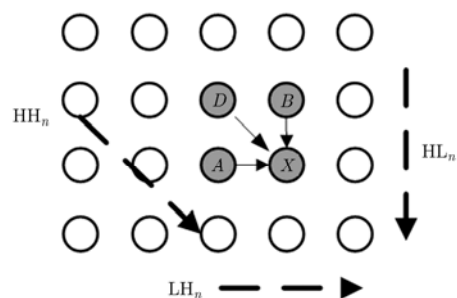


图 2 当前与相邻的小波系数

与  $X$  组成的矩形结构中, 一定也会具有这种方向性。也就是说, 如果可以用  $ABD$  来描述  $X$  的话, 那么位于不同子带的这种矩形结构, 也会具有这种不同的方向性。

以  $HL_n(n = 1, \dots, N)$  子带为例,  $n$  代表不同的尺度,  $N$  为小波分解层数, 虽然  $HL_n(n = 1, \dots, N)$  包含不同尺度的多个子带, 但由于它们具有相同的方向性, 所以归为同一类型。 $HL_n$  子带具有小波系数的幅度相关性表现为竖直方向强, 对角线方向较弱而水平方向最弱的特性。为简化问题, 取  $A$  与  $B$  来描述  $X$ , 即  $BX$  方向的相关性最强,  $AX$  方向的相关性最弱。如果用 1 表示某个系数在当前阈值下为有效, 用 0 表示无效, 那么  $A$  与  $B$  可能的状态只有 4 种, 用  $S_{AB}$  表示  $AB$  的状态, 那么  $S_{AB} \in \{00, 01, 10, 11\}$ 。 $P_{HLS}$  表示在状态  $S_{AB}$  下  $X$  为有效的概率, 即当  $AB$  分别处于不同状态时,  $X$  为有效的可能性为

$$p_{HLS} = (X = 1 | S_{AB}), S_{AB} \in \{00, 01, 10, 11\} \quad (1)$$

那么  $X$  为无效的可能性就为  $1 - P_{HLS}$ 。

$LH_n(n = 1, \dots, N)$  子带由于小波系数的幅度, 沿着水平方向的相关性强, 竖直方向弱, 所以同样可以用  $AB$  来描述  $X$ , 却表现为  $AX$  方向相关性强, 而  $BX$  方向相关性最弱, 结果见表 1。而  $HH_n(n = 1, \dots, N)$  子带由于具有对角方向小波系数幅度值相关性强的特点, 所以就不适合用  $A$  与  $B$  来描述  $X$ 。为了突出对角线方向, 用  $D$  来取代  $A$  或者  $B$ , 任选其一即可。本文用  $D$  取代  $A$ , 统计结果见表 2。

不同子带内的小波系数, 有些会取负值, 而这些小波系数的符号, 与小波系数的幅度一样, 在不同的子带区域, 有不同的方向性。用同样的方法对

表 1 Goodhill 8 bit 灰度图像经 5 层 Daubechies 9/7 小波分解, HL<sub>n</sub> 及 LH<sub>n</sub> 子带内邻近系数幅度关系表

$A$	$B$	$S_{AB}$	$P_{HLS}$	$P_{LHS}$
0	0	00	0.337849	0.325744
0	1	01	0.388530	0.320197
1	0	10	0.367586	0.446372
1	1	11	0.395437	0.496894

表 2 Goodhill 8 bit 灰度图像经 5 层 Daubechies 9/7 小波分解, HH<sub>n</sub> 子带内邻近系数幅度关系表

$B$	$D$	$S_{BD}$	$P_{HHS}$
0	0	00	0.307468
0	1	01	0.383152
1	0	10	0.374233
1	1	11	0.411765

小波系数的符号的特征进行统计, 结果见表 3。各表中的数据均统计于 Goodhill 8 bit 灰度图像经 5 层分解, 小波基为 Daubechies 9/7。

表 3 Goodhill 8 bit 灰度图像经 5 层 Daubechies 9/7 小波分解, 各子带内邻近系数符号关系表

$S_{AB} / S_{BD}$	$P_{HLS}$	$P_{LHS}$	$P_{HHS}$
00	0.474526	0.461607	0.506315
01	0.800900	0.246191	0.362981
10	0.343023	0.855081	0.472422
11	0.638158	0.702602	0.409639

在 SPIHT 图像的解码过程中, 当解码到任意小波系数  $X$  时, 假定当前信息比特表示的是该系数是否有效, 由于已知先前解码的  $A$ 、 $B$ 、 $D$  的有效性, 那么利用

$$L(x) = \log_b \frac{p(x=1)}{p(x=0)} = \log_b \frac{1-p}{p} \quad (2)$$

就可以求出  $X$  为有效的可靠性<sup>[1]</sup>, 其中  $L(x)$  为当前解码的  $X$  是否有效性的可靠性值,  $p$  取决于当前小波系数所在的子带,  $A$ ,  $B$ ,  $D$  的状态见表 1、表 2, 对数的基  $b > 1$ 。如果当前信息比特表示的是该系数的符号, 则利用表 3 的  $p$ 。在信道的解码时, 这个可靠性  $L(x)$  值就可以为信道解码提供来自信源的可靠性信息。

### 3 信道编解码

已编码的图像数据的信道编码编码方案为 RCPC/CRC 信道编码级联<sup>[8]</sup>。由于 SPIHT 算法对小波系数进行逐个比特平面的编码, 而同时不同的比特平面对解码重构图像的贡献不同, 所以不同比特平面的编码数据可以使用不同码率的信道编码进行不等错误保护, 此方法在很宽的 BER 范围内带来显著的 PSNR 的提升, 而只造成编码性能的轻微下降。提供不等错误保护的 RCPC 码的一个极有用的特点就是, 高码率的删余码为同家族内低码率的编码的嵌入式结构, 所以整个家族的编码是兼容的, 而且在同一输入码流的不同码率的情况下, 可以用同一个编码/解码对实现。CRC 码用来检测信道解码器未能消除的错误。

对于卷积码, 传统的维特比算法 VA(Viterbi Algorithm)是一种最大似然译码算法, 利用“硬”或“软”的输入以及信道状态信息, 解码出一个比特位的硬判决信息。而在同样可以输出解码比特的硬判决信息外, 软输出维特比算法 SOVA(Soft-Output Viterbi Algorithm)还可以提供有关解码比

特的可靠性信息, 文献[9]进一步说明将 VA 或 SOVA 算法扩展为 APRI-SOVA 后, 很容易就可以在解码过程中利用来自信源的先验/后验信息。

在信道解码时, 相对于时刻  $k$  的路径  $m$ , 用编码比特  $x_{k,n}$  ( $n=1, \dots, N$ ) 以及拥有先验软值  $L(u_k)$  的信息比特  $u_k$  标注的  $N$  维网格的新的度量  $M_k^{(m)}$  可表示为

$$M_k^{(m)} = M_{k-1}^{(m)} + \sum x_{k,n}^{(m)} L_{ck,n} y_{k,n} + u_k^{(m)} L(u_k) \quad (3)$$

其中

$$L(u_k) = \log_b \frac{p(u_k = 1)}{p(u_k = 0)} = \log_b \frac{1-p}{p} \quad (4)$$

是给定先验信息  $p = p(u_k = 0)$  信息比特  $u_k$  的对数似然比, 也就是可靠性数值, 软数值或  $L$  值。对数的基  $b > 1$ 。

$$L_{ck,n} y_{k,n} = \log_b \frac{p(y_{k,n} | x_{k,n} = 1)}{p(y_{k,n} | x_{k,n} = 0)} \quad (5)$$

是信道的软输出值(包括匹配滤波器输出  $y_{k,n}$ )。对于充分交织的衰落信道,  $L_{ck,n}$  是信道的可靠性数值, 可表示为<sup>[2]</sup>

$$L_{ck,n} = \frac{4a_{k,n}}{\ln b} E_s / N_0 \quad (6)$$

式中  $a_{k,n}$  为 Rayleigh 衰落信道的衰落因子。在 AWGN 信道中,  $a_{k,n}$  为 1。VA 算法进行最大后验概率搜索, 寻找具有最大度量  $\max_m \{M_k^{(m)}\}$  的路径。

假定之前的解码比特以及变化的比特(1→0 or 0→1)在统计上相互独立, 这种相关的先验值  $L$  就可以利用前面介绍的方法计算出来。

## 4 仿真结果

仿真中使用的信道模型为

$$y_i = a_i x_i + n_i \quad (7)$$

其中  $x_i \in \{+\sqrt{E_s}, -\sqrt{E_s}\}$  是第  $j$  个传输的对极信号, 能量为  $E_s$ ,  $y_i$  是对应于  $x_i$  的接收信号,  $n_i$  是均值为 0 方差为  $N_0/2$  的加性高斯白噪声。对于 AWGN 信道,  $a_i$  为常数 1, 对于充分交织的 Rayleigh 信道,  $a_i$  是服从 Rayleigh 分布的衰落因子。充分交织表示  $a_i$  与  $a_j$  ( $i \neq j$ ) 统计意义上相互独立。

使用  $512 \times 512$  的 8 bit 灰度图像 Goodhill 对本文提出的方案进行测试。图像经 Daubechies 9/7 小波 5 层分解, SPIHT 编码算法, 未进一步使用算术熵编码。作为先验信息提供给 APRI-SOVA 解码器的小波系数的  $P_{HLS}$ ,  $P_{LHS}$ ,  $P_{HHS}$  值, 为预先统计的该图像整数比特平面的全部有效系数。不同图像的上述  $P$  值并不相同, 仿真使用的  $P$  值只针对 Goodhill 图像。而且同一副图像的不同比特平面的

$P$  值的统计结果也有差别, 但它们的大致趋势相同。显然随着解码端正确解码的比特数增加, 可以实时统计图像的  $P_{HLS}$ ,  $P_{LHS}$ ,  $P_{HHS}$ , 为简化解码算法, 仿真中使用的是预先计算的全部有效系数统计结果。

对编码图像数据信道编码方案为 CRC 的外码与 RCPC 的内码级联。对于不等错误保护策略是, 最强的信道编码应该能够在给定的信道条件下移除几乎全部的误码, 而较低的信道编码用来保护较低的比特平面。在实际测试中,  $\{8/24\}$  码率的 RCPC 码用来保护前 3 个包,  $\{8/22, 8/20, 8/18\}$  码率的 RCPC 码保护接下来的 3 个包, 而  $\{8/16\}$  码率的 RCPC 码保护其余的包。码率信息为编码端与解码端事先约定, 不需经信道传输。信源信道编码的整体编码率为 0.5 bpp, 其中信源为 0.24 bpp, 信道为 0.26 bpp。

不同信道信噪比下, 接收端分别使用 SOVA 解码及 APRI-SOVA 解码的结果对比, 每种信道条件下重复 100 次, 结果取均值。

图 3 为 AWGN 信道, 不同信道信噪比条件下, SOVA 解码器与 APRI-SOVA 解码器效果对比, 总编码率为 0.5 bpp。结果表明在低信噪比条件下尽管位于高比特平面的数据得到了很好的保护, 但是由于对应误码较大, 在保护较差的解码数据中很快就出现了无法消除的误码, 所以重建图像质量不高。随着信道条件的改善, 正确解码的数据包也随之增加, 所以重建图像的质量也随之改善。在使用了 APRI-SOVA 解码器后, 由于信源可靠性信息的引入, 进一步提高了信道解码的抗误码能力。随着信道信噪比的提高, 信道误码减少, 信道解码器的可靠性增高, 相对信源的可靠性随之减弱, 抗误码性能逐渐与 SOVA 接近。

仿真的 Rayleigh 信道快速及慢速衰落的情形, 快衰落以短而且频繁的形式分布在整体比特流上, 而慢衰落则表现为典型的突发错误。仿真快衰落时, 大约每 20 个编码比特中存在一次影响 1 到 2 个比特的深度衰落。在慢速时, 一次深度的衰落大约影响每 500 个编码比特中的 10 到 15 个连续位。与 AWGN 信道类似, 在解码端使用 APRI-SOVA 替代 SOVA 可以提高性能。当影响的连续位数进一步增多(衰落变慢)时, 解码性能的增益也开始变小。非常慢衰落信道时, 无论是 SOVA 还是 APRI-SOVA 通常都无法纠正突发错误。事实上, 衰落会导致传输质量的严重退化。通常使用交织技术来对抗这种影响。图 4 为 Rayleigh 信道在  $E_s/N_0$  为 1 dB 时两种解码算法的实际效果对比。

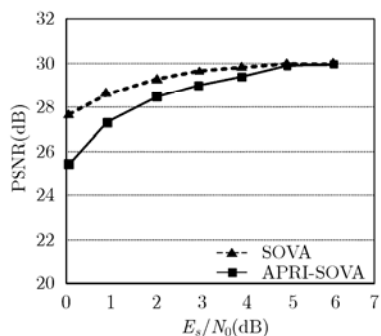


图3 SOVA解码器与APRI-SOVA解码器效果对比



(a) SOVA 解码 PSNR25.81 dB



(b) APRI-SOVA 解码 PSNR27.72 dB

图4 Rayleigh信道在 $E_b/N_0$ 为1 dB时解码图

## 5 结束语

图像小波系数存在树结构的相关性,同时又存在子带内部的相关性,而目前的编码器无法将这两种相关性同时利用。未被编码器使用的相关性可以被联合信源信道解码器用来进一步消除解码错误。本文给出了 SPIHT 编码算法下,利用图像小波系数子带内的未编码冗余,与 APRI-SOVA 信道解码算法结合的信源控制型联合信源信道解码算法,提高了噪声信道下图像的传输能力。由于该算法下的信源编码器无法使用熵编码,所以编码效率略有损失。前文提到,另一种高效的信源编码算法 EBCOT,同样存在遗留冗余,即小波树结构的相关性,也可以利用本文算法。但由于 EBCOT 采用部分比特平面编码与自适应算术熵编码相结合,使得信源解码与信道解码器联合的复杂度大幅增加。相关算法的研究计划在后续的工作中进行,本文就不予以讨论了。

## 参 考 文 献

- [1] Hagenauer J. Source-controlled channel decoding[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1995, COM-43(9): 2449-2457.
- [2] Xu Wen, Hagenauer J, and Krgen J. Joint source and channel decoding of compressed still images[J]. *ELSEVIER Signal Processing: Image Communication*, 1999, 15(3): 217-229.
- [3] Yao Lei and Cao Lei. Progressive image transmission with

genetic algorithm-based optimization and multiple cyclic redundancy check structure[J]. *SPIE Journal of Electronic Imaging*, 2008, 17(2): 302-309.

- [4] Tripathi S and Mahaldar S. Joint source channel coding for wireless medium using SPIHT-RS codec[C]. *Ad hoc and Ubiquitous Computing*, Surathkal, India, Dec. 20-23, 2006: 175-178.
- [5] Xiang Wei-wei and Lu Pei-zhong. Joint source channel soft decoding using dynamic redundancy detection[C]. *Networks Security Wireless Communications and Trusted Computing*, Wuhan, China, April. 25-26, 2009, 1: 576-579.
- [6] Yang Yang, Yi Wei-dong, and Chen Yong-ru, *et al.*. Iterative joint source channel decoding in wireless sensor networks[C]. *Communications Circuits and Systems*, Xiamen, China, May 25-27, 2008: 109-113.
- [7] Sloane N J A, Wyner A, and Shannon C E. *Collected Papers*[M]. New York: IEEE Press, 1993: 58-59.
- [8] Sherwood P G and Zeger K. Progressive image coding for noisy channels[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 1997, 4(7): 189-191.
- [9] Hagenauer J. Rate-compatible punctured convolutional codes and their applications[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1988, 36(4): 389-400.

张 晔: 男, 1960 年生, 教授, 博士生导师, 研究领域为遥感图像处理、图像传输、匹配制导和数据融合等。

王 申: 男, 1972 年生, 博士生, 研究方向为信号与信息处理、图像编码与传输等。