

# 基于 SPIHT 压缩编码的 SAR 图像传输容错算法

黄博阳<sup>1,2</sup> 韩松<sup>1</sup>

(1 中国科学院电子学研究所 北京 100190; 2 中国科学院大学 北京 100039)

**摘要:** 合成孔径雷达(SAR)系统工作时产生的大量数据需要压缩传输,多级树集合分裂(SPIHT)算法性能优越但对信道噪声敏感,需要必要的容错机制。提出了一种噪声信道中传输 SAR 幅度压缩图像的容错算法,称为 LLCH (LL coefficients hiding)算法。该算法对 SPIHT 编码后的码流进行基于编解码过程的数据分组,保证发生误码后解码端可重新同步;将码流中低频、次低频系数分组嵌入高频各过程末尾数据分组进行数据隐藏,达到保护重要系数的目的;对损伤或丢失的高频系数,利用父子节点间系数的相关性进行线性内插恢复。实验结果表明该算法在较小的冗余开销下,有效提升了复原图像的质量。

**关键词:** SAR 图像;SPIHT 编码;数据隐藏;错误隐藏

**中图分类号:** TN957.52    **文献标识码:** A    **国家标准学科分类代码:** 510.4050

## Error-resilience algorithm for SAR image transmission based on SPIHT coding

Huang Boyang<sup>1,2</sup> Han Song<sup>1</sup>

(1 Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** Synthetic aperture radar (SAR) systems produce large amounts of data which needs to be compressed and transferred. SPIHT compression algorithm performance superior, but the coded images have fragile visual quality when transmitted across the noisy channel. An error-tolerance mechanism is necessary. An error-resilience algorithm called LL coefficients hiding (LLCH) for transmission of synthetic aperture radar (SAR) amplitude compression images in noisy channel is presented. The proposed method partitions data based on the coding process after the set partitioning in hierarchical tree (SPIHT's) coding process, to ensure that the decoder can re-synchronize after the error occurs. The most significant low frequency and sub-low frequency coefficients are embedded into the end of high frequency data packets to achieve the purpose of protecting the important coefficients. For the high frequency coefficients of damage or loss, linear interpolation is used to recover the coefficients rely on the correlation between subbands. The experimental results show that the algorithm can effectively improve the quality of the restored image under the tiny redundancy cost.

**Keywords:** SAR image; SPIHT coding; data hiding; error concealment

## 0 引言

随着近些年合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)系统在军民领域的应用不断增多,系统分辨率等性能指标也不断提升,SAR 系统在工作时产生越来越多的数据。这些海量数据的存储和传输给系统带来了巨大的压力,因此需要对 SAR 数据进行压缩<sup>[1]</sup>。由于 SAR 原始数据、SAR 图像相位数据相关性差,直接对 SAR 原始数据或是复图像数据进行压缩,得到的压缩比不高,故而大多数研

究聚焦于 SAR 幅度图像的压缩。不同于光学图像,SAR 幅度图像纹理丰富、动态范围大、具有固有的相干斑噪声,采用传统 DCT 等方法压缩效果较差,实际中多采用基于小波变换的 JPEG2000 或多级树集合分裂(SPIHT)算法进行压缩。此外,文献中还出现了利用多尺度几何分析方法<sup>[2]</sup>、基于内容的智能方法<sup>[3]</sup>、结合去噪的压缩方法<sup>[4]</sup>和压缩感知方法<sup>[5]</sup>等对 SAR 幅度图像进行压缩的研究。

考虑 SAR 幅度图像压缩时,SPIHT 算法压缩比高、复原图像还原度好,性能甚至优于压缩光学图像的国际标准

算法 JPEG2000,是目前常用的一种压缩方法。但是在噪声信道中,少量误码就会对采用变长编码的 SPIHT 比特流传输带来灾难性的后果<sup>[6]</sup>。码流在信道传输过程中 1 Byte 的错误就可能对导致复原图像完全畸变,所以容错机制在 SPIHT 算法的实际应用中起到不容忽视的作用。

目前,基于光学图像的 SPIHT 压缩容错方法有不少研究。Mobin 等人<sup>[7]</sup>提出了使用八进制正交幅度调制对压缩数据进行不等差错保护的方案。Yang 等人<sup>[8]</sup>将小波域系数按水平、竖直和对角线 3 个方向作为图像的 3 个不同描述,分别传输以对抗信道误码的影响。Deng 等人<sup>[9]</sup>结合压缩感知的思想对损伤图像进行近似恢复。Huang 等人<sup>[10]</sup>提出了依照彩色图像各颜色分量对传输图像进行多描述编码的容错机制。天津大学的丁学文<sup>[11]</sup>提出了一种基于数据隐藏的容错方案。上述研究对于光学图像 SPIHT 编码传输起到了很好的效果,但对于噪声、动态范围大且纹理丰富的 SAR 幅度图像性能并不好,需要针对 SAR 幅度图像的特点进行优化。

目前针对 SAR 图像鲁棒编码传输已有的研究则未针对 SPIHT 编码进行,且大多数研究仅针对图像的小部分目标区域:文献[12]针对 SAR 图像的目标区域,提出了固定质量的传输方案;Karvonen 等人<sup>[13]</sup>详细分析了小波系数间的统计特性,重新设计了基于小波变换的编码器,其研究侧重于 SAR 图像的细节部分,有效地应用于海上浮冰的 SAR 图像传输。文献[14]对图像进行 BCH 编码预处理后再进行信源编码,以提高传输的鲁棒性;或是将抗误码熵编码(EREC)添加到信源信道编码之间以提高抗误码能力<sup>[15]</sup>。但这些方法在获得容错能力的同时也降低了图像压缩比。

在尽量不影响压缩码率的情况下,采用数据隐藏技术对关键系数进行保护是一种较好的方式。数据隐藏技术(data hiding)原本是网络安全领域的一个术语,常见用途包括数字水印和图像认证等<sup>[16]</sup>。数据隐藏是指将从图像、视频、文稿等文件中抽取或人为添加的一些特征信息嵌入原文件中,同时保证信息嵌入前后文件差异难以被人察觉<sup>[17]</sup>。在图像传输的过程中利用数据隐藏技术进行信息保护的一般过程为将发送端原始数据中提取的一些重要数据,以替换不重要数据的方式嵌入到原序列中,再进行传输。接收端收到数据后,先检测数据是否受到信道误码的影响。如果发现重要数据损坏,则提取备份数据将重要数据恢复,再进行解码等操作。

对于 SPIHT 编码过程处理的小波系数而言,信息集中于低频系数区,而高频系数则相对不重要。利用数据隐藏的方式可以对重要的低频系数进行保护。

结合上述考虑,本文提出了一种基于 SPIHT 压缩编码的 LLCH(LL coefficients hiding)算法,对 SAR 幅度图像进行容错传输。LLCH 算法采取变长数据分组传输的方式,使解码器可以在较小开销下,利用各个分组头信息重新同

步,防止误码的影响无限制扩散;对于小波分解后得到的重要低频及次低频系数数据利用数据隐藏的方式进行保护;并对解码后产生的误码影响,利用子带间小波系数线性内插的方式进行错误隐藏。最后,通过实验验证了该算法的性能。

## 1 SPIHT 算法

SPIHT 算法即多级树的零树分割编码算法,是一种静态图像小波域的压缩方法,SPIHT 算法对小波系数按比特位进行比较,并通过规定系数扫描顺序的方式将位置信息隐含到比特流中,能够在较低的比特率下得到较高质量的重构图像<sup>[18]</sup>。

### 1.1 小波变换

小波变换作为近些年研究的热点,是时间和尺度上的局部变换,能够将信号中所需的信息聚集并提取出来,有“数字显微镜”的美称<sup>[19]</sup>。从效果上来看,小波变换可以将图像大部分能量集中到低频系数 LL 中,图 1 展示了一个三级小波分解的示意图。随着小波变换的级数增加,能量就更加集中,更有利于实现数据的压缩编码。

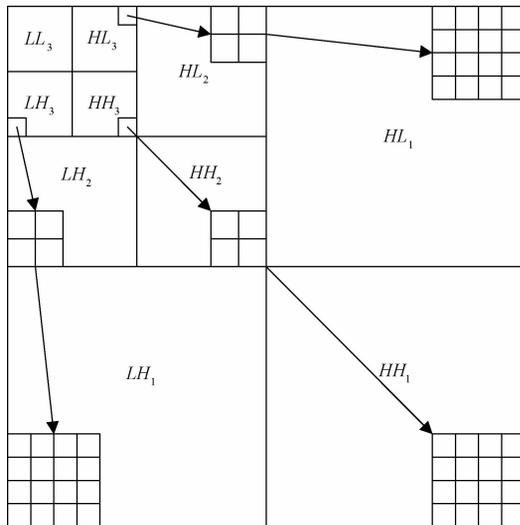


图 1 小波变换及空间方向树结构

### 1.2 SPIHT 算法简介<sup>[18, 20]</sup>

SPIHT 算法是一种基于空间方向树的编码方法,空间方向树是一种特殊的二叉树结构。除了最低频子带 LL 没有父节点、最高频的子带没有子节点外,各系数在其共同方向相邻高频子带的对应位置上均有 4 个子节点,图 1 中的箭头展示了节点间的父子关系。

SPIHT 算法的编码思想是通过渐进的方式,依照各个小波系数的最高比特位数来逐步逼近各系数的准确值。为表示的方便,SPIHT 算法对空间方向树的任意节点  $(i, j)$ ,定义了 4 种集合:直接子节点集合  $O(i, j)$ 、所有后继节点集合  $D(i, j)$ 、除直接后继以外的后继节点集合  $L(i, j)$  以

及最高层根节点集合  $H(i, j)$ 。根据上述定义, 不难得知  $L(i, j) = D(i, j) - O(i, j)$ , 而  $H(i, j)$  则为图像最低频的小波系数集合, 聚集了图像的大部分能量。在图 1 中,  $H(i, j)$  就是子带  $LL_3$ 。

SPIHT 算法的基本运算非常简单, 只需比较任意节点位置的小波系数与门限阈值  $T = 2^n$  的大小关系, 若系数大于或等于阈值, 则认为该系数重要; 反之则认为系数不重要。若某一集合  $A$  中仅包含非重要系数, 则称  $A$  不重要; 否则, 就认为  $A$  重要。常用符号  $S_n(A)$  作为集合重要与否的标志, 其公式描述为:

$$S_n(A) = \begin{cases} 0, & \max_{(i,j) \in A} \{ |C(i,j)| \} < 2^n \\ 1, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $C(i, j)$  表示元素  $(i, j)$  的值, 0 表示不重要, 1 则表示重要。

实际系统中, SPIHT 算法采用 3 个控制链表来描述任意时刻的编码状态: 链表 LSP(list of significant pixels) 称为重要像素链表, 用来保存重要系数的节点信息; 链表 LIP(list of insignificant pixels) 即非重要像素链表, 用来保存非重要系数的节点信息; 非重要集合链表 LIS(list of insignificant sets) 略为特殊, 保存的是非重要集合  $D(i, j)$  或  $L(i, j)$  对应的父节点  $(i, j)$ , 并以类型 A 或 B 的方式对  $D(i, j)$  与  $L(i, j)$  进行区分。

在 SPIHT 编码过程中, 首先, 3 个链表按照预先设定的参数进行初始化, 之后每个比特层  $n$  进行分类扫描和系数细化两步操作。在分类扫描过程中, LIP 中的元素依次与当前阈值进行比较, 将那些重要的元素移出, 并添加至 LSP 中; 同样的, 在 LIS 中的集合也按照同样的原则进行顺序的评价, 当发现某集合重要时, 就分割该集合, 并从 LIS 链表将它删除。超过一个元素的新集合被重新添加到 LIS 的末尾, 而对于单坐标的集合被添加到 LIP 或者 LSP 的末尾。在系数细化过程中, 编码器则对 LSP 中现有的元素进行细化更新。上述过程的每一步都输出 1 位 0/1 数据, 直到达到要求输出的比特长度时结束编码。

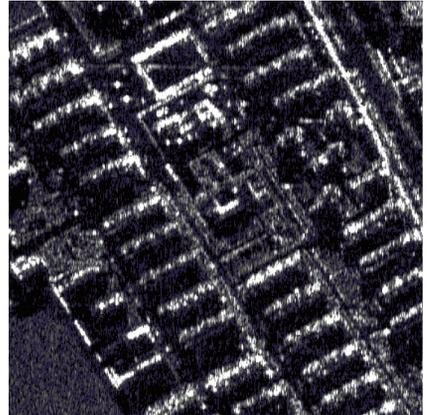
SPIHT 解码过程和编码过程十分相似, 同样是对 LIP、LIS 和 LSP 三个链表不断进行元素进出的操作。相对于编码器中输出码流, 解码器根据接收到的码流逆向进行数据近似恢复。

### 1.3 SPIHT 算法分析

1) SPIHT 算法对于每轮阈值的处理过程, 可以细化为处理 LIP 中元素并更新控制链表、处理 LIS 中元素同时更新控制链表和对 LSP 元素进行细化 3 个环节。

2) 算法中, 编码并不输出链表 LIS、LIP 或 LSP 的任意内容, 它们仅用来描述当前编码状态。而编码时真正输出的只有三类 0/1 比特值: 重要性判决值  $S_n(A)$ 、元素添加至表 LSP 时记录的符号值、LSP 元素细化操作增添的比特位值。解码端, 每一位相应比特信息的解释方式由扫描顺序和已接收的比特位信息(控制链表状态)共同决定, 这也是

为什么噪声信道中误码会对输出造成灾难性后果的原因, 图 2 展示了不加任何容错机制条件下, 分类扫描过程输出码中 1 位比特误码(第 5 个信息比特由 0 变为 1)导致的图像复原结果。



(a) 原始 SAR 幅度图像



(b) 无误码解码图像



(c) 第 5 信息比特误码下解码图像

图 2 1 bit 误码导致复原图像的灾难性后果  
(实验参数: 6 层“bior4.4”小波变换, 压缩比 16:1)

## 2 LLCH 算法

嵌入式比特流输出的方式为 SPIHT 算法带来了性能

上的高压缩比,但同时降低了算法对传输信道误码的鲁棒性。基于文献<sup>[6, 8]</sup>等提出的思想,考虑到 SAR 幅度图像的

固有特点,本文提出了基于低频系数隐藏的 LLCH 算法,图 3 展示了该算法运行时完整结构。

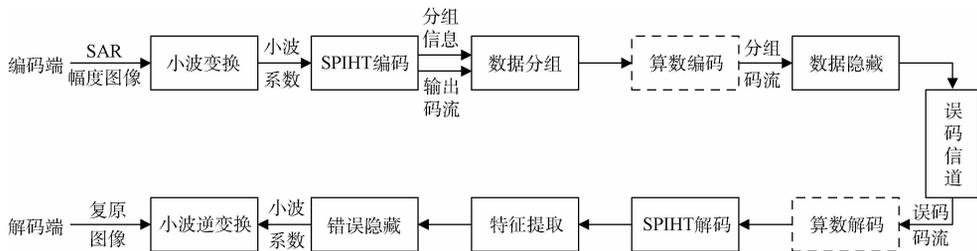


图 3 LLCH 容错算法系统

该算法主要包括编码码流语义变长分组、低频重要系数数据隐藏和损伤系数插值恢复 3 个步骤。

为了使算法在噪声信道中仍能正常工作,编码器需要在数据码流中断续性插入同步信息,以保证在误码发生后仍能够重新同步,继续进行解码。考虑到数据通信常分块进行传输的特点,LLCH 算法采用在比特流分组时添加同步信息的方式。

对于变换后的小波系数来说,低频  $LL$  和次低频  $HL$ 、 $LH$  与  $HH$  系数中集中了大部分图像能量,相对于其他高频系数,这些系数对于复原图像质量起到决定性的作用。算法利用数据隐藏的方式牺牲少量高频系数,保护重要的低频、次低频系数,使其在噪声信道传输中几乎不受损伤的效果。

而对于损伤或丢失的高频小波系数则利用小波系数间的相关性近似恢复的方式进行处理。

### 2.1 数据分组方式

SPIHT 算法实际上是一种变长编码方式,解码时对码流的解释不仅取决于当前比特,还取决于之前的比特信息。采用数据分组并添加同步信息的方式可以将误码限制在分组内。

可分组零树小波(PZW)方案<sup>[21]</sup>将 SPIHT 输出码流分组为固定 48b 负载长的数据包。受限于固定负载长度的限制,分组头部需要添加较长的同步信息。根据编解码每轮操作重复执行 LIP 链表处理、LIS 链表处理和 LSP 链表精炼的特点,可以依据编解码过程对输出码流进行边长分组,达到数据包顺序隐含部分同步信息的特点。

对于较长的链表处理过程,可依处理顺序进行进一步细分,细分步长可根据实际情况在压缩比和容错性能间折中选择(较长分组组头数据冗余总量少,发生误码时丢失数据长度较长;反之同理)。细分处理可能会导致该过程最后一个分组负载数据量较小,影响数据压缩效率。而链表末尾的元素多为表中最高频元素,实际中多为全 0 数据。

### 2.2 低频和次低频系数的数据隐藏

在 SPIHT 算法中,最终得到的小波分解系数包括低频子带  $LL$  系数和若干高频子带系数。根据小波分解的原

理,数据的低频分量几乎全部集中在  $LL$  系数和次高频系数中。而人眼视觉特性(HVS)具有对低频信息敏感而对高频信息不敏感的特点,所以对于图像数据的恢复效果来说, $LL$  系数和次高频系数最为重要。记图像数据  $LL$  系数和次高频系数编码为码流数据中的前  $n$  个数据包,将它们作为数据隐藏的特征数据<sup>[22]</sup>。

在图 4(a)中,装有  $LL$  系数和次高频系数的码流数据被复制,然后替换掉高频系数分组各过程的最后一个分组数据包。解码端如果在低频及次低频分组数据包(前  $n$  个数据包)中检测到误码,则利用各高频系数末尾数据包中的备份数据进行复原,如图 4(b)所示。修复后,在嵌入码流原位置写 0,以尽量减少数据隐藏的影响。在噪声信道中,需保护数据与嵌入数据同时发生误码的概率远低于原本发生误码的概率,达到了保护图像数据关键特征的目的。被替换的高频系数则可采用下一小节中将要说明的错误隐藏方法进行恢复,以保证复原后图像数据的质量。

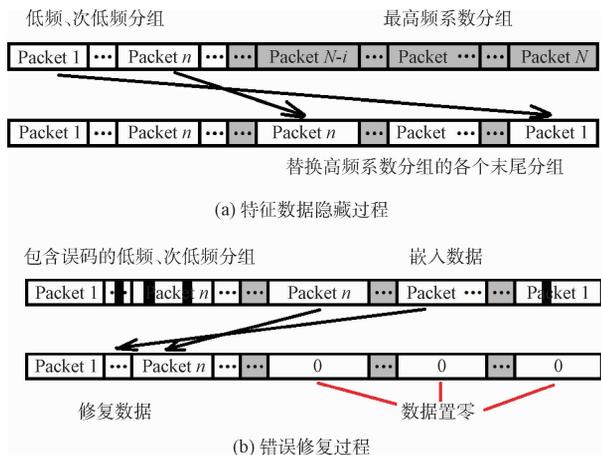


图 4  $LL$  系数和次高频系数的数据隐藏过程

### 2.3 高频丢失系数的数据恢复

在对  $LL$  系数和次高频系数进行保护时,采用高频数据包替换的方式进行了数据隐藏;除此之外,高频系数本身也会受到误码损伤的影响。丁学文等<sup>[6,11]</sup>提出可利用小波域系数之间的非平凡相关性,通过正确接收的无损小波

系数线性内插恢复损伤高频系数。

由于 SAR 幅度图像变换得到的小波系数间仍存在弱相关性,可以根据这一特点对损伤的高频小波系数进行估计。理论上同子带及子带间的小波系数均存在相关性,可选取损伤系数同子带内正确接收的系数,亦可利用其父子节点对应小波系数对损伤系数进行估计。实际数据表明,利用父子节点的相关系数作为参考通常可以获得更好的效果<sup>[6,11]</sup>,故本文仅采用子带间的小波系数相关性进行数据恢复,从而达到错误隐藏的目的。

对于损伤或丢失的高频小波系数  $Y_n$ , 其估计  $\hat{Y}_n$  可近似认为是  $N$  个观测值  $x_{n-N}, x_{n-N+1}, \dots, x_{n-1}$  的线性组合:

$$\hat{Y}_n = \sum_{k=1}^N a_k x_{n-k} \quad (2)$$

式中:  $a_k$  表示观测值  $x_{n-k}$  对应的线性系数。最优估计应保证  $\hat{Y}_n$  的均方误差 (MSE) 最小, 则最优系数向量  $\mathbf{a} = [a_1, a_2, \dots, a_N]$  为 Yule-Walker 方程的解:

$$\mathbf{R}_{XX} \mathbf{a} = \mathbf{r}_{yx} \quad (3)$$

其中  $\mathbf{R}_{XX}$  和  $\mathbf{r}_{yx}$  分别为:

$$\mathbf{R}_{XX} =$$

$$\begin{bmatrix} E[X_{n-1}^2] & E[X_{n-1}X_{n-2}] & \cdots & E[X_{n-1}X_{n-N}] \\ E[X_{n-2}X_{n-1}] & E[X_{n-2}^2] & \cdots & E[X_{n-2}X_{n-N}] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ E[X_{n-N}X_{n-1}] & E[X_{n-N}X_{n-2}] & \cdots & E[X_{n-N}^2] \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{r}_{yx} = [E[Y_n Y_{n-1}] \quad E[Y_n Y_{n-2}] \quad \cdots \quad E[Y_n Y_{n-N}]] \quad (5)$$

在实际应用中,  $\mathbf{R}_{XX}$  和  $\mathbf{r}_{yx}$  的精确值不易得到, 可以利用经验数据进行近似估计。图像变换后得到的系数可近似认为是平稳随机序列, 可取  $\mathbf{R}_{XX}$  和  $\mathbf{r}_{yx}$  的  $M$  阶近似值:

$$\tilde{\mathbf{R}}_{XX} = \frac{1}{M} \mathbf{H}^T \mathbf{H}, \tilde{\mathbf{r}}_{yx} = \frac{1}{M} \mathbf{H}^T \mathbf{u} \quad (6)$$

其中,

$$\mathbf{u} = [Y_{n-1} \quad Y_{n-2} \quad \cdots \quad Y_{n-M}]^T \quad (7)$$

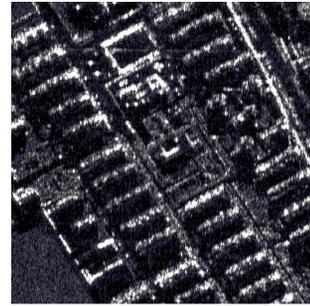
$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} X_{n-2} & X_{n-3} & \cdots & X_{n-1-N} \\ X_{n-3} & X_{n-4} & \cdots & X_{n-2-N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{n-M-1} & X_{n-M-2} & \cdots & X_{n-M-N} \end{bmatrix} \quad (8)$$

在式(5)和(8)中,  $Y_{n-1}, Y_{n-2}, \dots, Y_{n-M}$  是  $M$  个有效采样值, 利用其父子节点对应小波系数作为采样值。  $\mathbf{H}$  的第  $i$  行表示与  $Y_{n-i}$  相关的观测值。

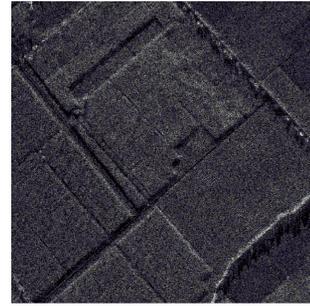
除此之外, 也可以通过空域插值恢复等方法对高频系数的损伤进行处理。

### 3 实验结果与分析

实验选取了两幅实测 SAR 图像大小为  $512 \times 512$  的局部区域进行验证, 实验图像如图 5 所示, 其中图 5(a) 为某港口附近的建筑物, 图像纹理细节较为丰富; 图 5(b) 则为典型的农田区域, 其图像像素间的变化相对平缓。



(a) 样本1



(b) 样本2

图 5 测试用 SAR 原始 8 bit 幅度图像

实验中采用 bior4.4 小波基对数据进行小波变换, 分别采用 0.5 bpp 和 1 bpp 的像素深度压缩比对数据进行压缩。图 6 中展示了在 0.5 bpp 和 1 bpp 像素深度下复原图像峰值信噪比 (PSNR) 随着小波分解级数增加的变化情况。程序运行时间也随着小波分解级数的增加而增长, 故采用 6 级小波分解进行算法效果验证。

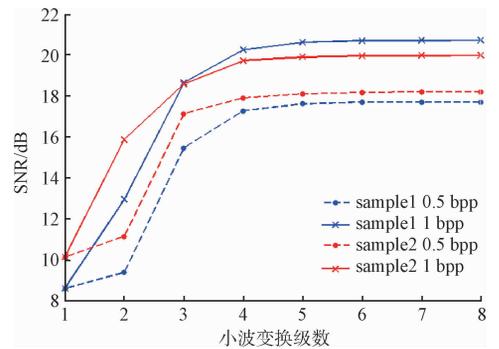


图 6 复原图像 PSNR 随着小波分解级数增加的变化情况

考虑到数据隐藏过程中, 高频系数分组被替换的数据在解码时均变为 0 数据, 这会导致无损信道传输时解码图像的质量降低, 是否使用 LLCH 算法在不同像素深度下对无损解码图像 PSNR 的影响如表 1 所示。可以看到, 使用 LLCH 算法导致无损情况下解码图像退化不到 0.05 dB, 一般情况下肉眼难以察觉。

为了评估 LLCH 算法的性能, 本文用 4 种丢包率 (5%, 10%, 15% 和 20%) 对是否使用 LLCH 算法进行容错的重建图像质量进行比较, 结果表 2 所示。在 20% 丢包率

表 1 使用与不使用 LLCH 算法条件下无损解压 PSNR 对比

像素深度/bpp	样本 1		样本 2	
	0.5	1	0.5	1
	不使用 LLCH 算法/dB	17.71	20.71	18.20
使用 LLCH 算法/dB	17.67	20.69	18.17	19.98

时,使用和不使用 LLCH 算法的复原图像如图 7 所示。因为使用 LLCH 算法所造成的压缩效率损耗情况如表 3 所示。

表 2 不同丢包率下解码图像 PSNR 对比

丢包率/%	样本 1,0.5 bpp			
	5	10	15	20
不使用 LLH 算法/dB	16.80	15.19	14.56	12.92
使用 LLH 算法/dB	17.02	16.84	16.37	15.09
丢包率	5	10	15	20
不使用 LLH 算法/dB	17.49	16.13	15.11	13.83
使用 LLH 算法/dB	18.05	17.71	16.98	16.61

丢包率/%	样本 1,1 bpp			
	5	10	15	20
不使用 LLH 算法/dB	16.42	14.77	12.29	11.92
使用 LLH 算法/dB	18.07	17.63	17.35	17.19

丢包率/%	样本 2,0.5 bpp			
	5	10	15	20
不使用 LLH 算法/dB	17.13	16.67	15.91	15.68
使用 LLH 算法/dB	18.85	18.53	17.90	17.83

表 3 使用与不使用 LLCH 算法条件下压缩比情况对比

像素深度/bpp	样本 1		样本 2	
	0.5	1	0.5	1
不使用 LLCH 算法	15.2802:1	7.5980:1	16.2528:1	7.7412:1
使用 LLCH 算法	15.3447:1	7.5876:1	16.2248:1	7.7347:1

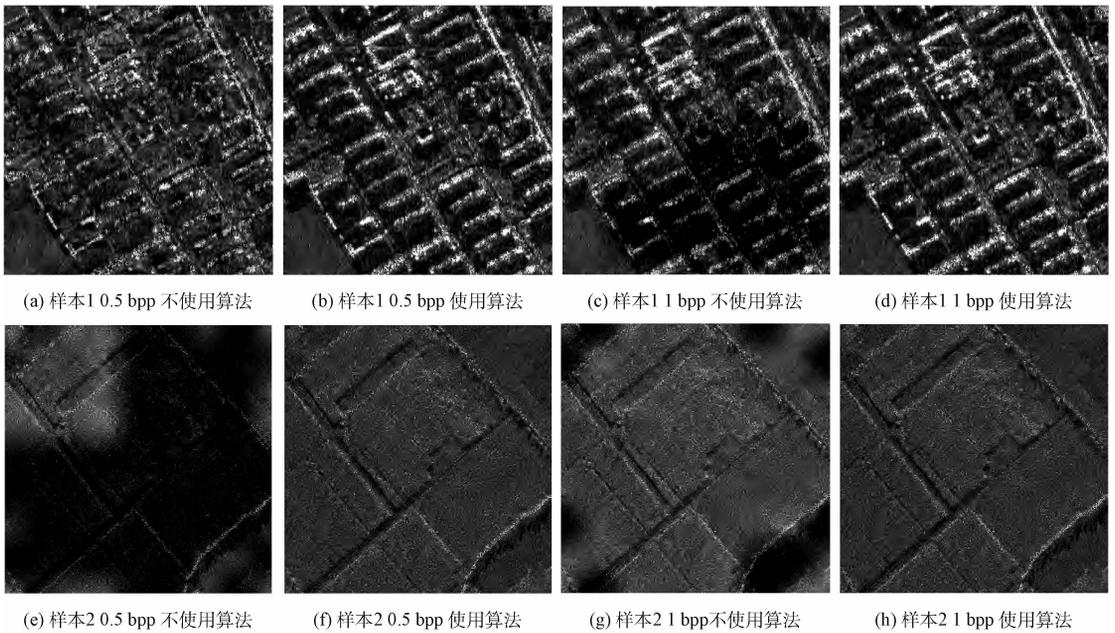


图 7 20%丢包率时,使用和不使用 LLCH 算法的复原图像

从实验结果可以看出,由于 LLCH 算法替换的是各过程的尾部分组,降低压缩比的同时也冲淡了分组包头对压缩比的影响,总体压缩效率几乎没有下降,当替换掉较长尾部数据包时甚至可能提高压缩比。对复原图像的质量则有明显的提升,复原图像的 PSNR 有 2~5 dB 不等的提升,随着数据包丢失率的增加,容错的主观效果和客观性能改善也越为明显。

### 4 结 论

随着 SAR 系统成像时产生的数据量不断增加,对 SAR 数据进行压缩传输在实际系统中愈发普遍。对于 SAR 幅度图像,性能优越的 SPIHT 算法由于其变长嵌入式编码的特点,对噪声信道中的误码十分敏感。本文研究了针对光学图像的 SPIHT 容错方案,并结合 SAR 幅度图像特点,提出了改进后的 LLCH 算法。算法通过变长的数

据分组、有效的重要低频系数保护和受损高频系数恢复 3 个步骤为 SPIHT 压缩方法提供了有效的容错机制。

实验结果证明 LLCH 容错算法在几乎不增加数据冗余的情况下,可以明显改善解码图像的质量。此外当信道条件变差,数据分组丢失率增加时,解码图像的主观效果和客观性能改善也越加明显,因此本文提出的算法可行、容错效果良好。实际应用 LLCH 算法时,使用改进的 SPIHT 算法<sup>[23-24]</sup>及优化的高频系数恢复方法还可进一步提高解码图像的 PSNR。

## 参考文献

- [1] 许学杰,潘志刚,刘畅,等. 基于自适应比特分配的 SAR 复图像频域压缩算法[J]. 科学技术与工程, 2015,15(18):61-65.
- [2] 郭琦南. 多尺度几何分析技术在 SAR 图像处理中的应用研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2006.
- [3] 袁小红,朱兆达,张弓,等. 基于目标的低码率 SAR 图像压缩[J]. 中国图象图形学报 A, 2010, 15(3): 455-461.
- [4] 金海燕,王彬. 基于第二代 Bandelet 变换的 SAR 图像去噪压缩[J]. 微电子学与计算机, 2010, 27(9): 103-108.
- [5] 许学杰,潘志刚,刘畅,等. 基于压缩感知的 SAR 图像压缩算法[J]. 中国科学院大学学报, 2015, 32(6): 790-796.
- [6] 丁学文,杨兆选,曹继华,等. SPIHT 编码图像传输的错误保护技术[J]. 中国图象图形学报, 2007, 12(10): 1802-1805.
- [7] MOBI A, MOINUDDIN A A, KHAN E, et al. Optimized multi-layered unequal error protection of SPIHT coded images using 64-HQAM [C]. International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI), 2016: 2213-2218.
- [8] YANG S H, CHENG P F. Robust transmission of SPIHT-coded images over packet networks [C]. IEEE Transactions on Circuits & Systems for Video Technology, 2007:558-566.
- [9] DENG C, LIN W, LEE B S, et al. Robust image coding based upon compressive sensing [C]. IEEE Transactions on Multimedia, 2012: 278-290.
- [10] HUANG C P, HWANG B J, MAO C I, et al. A multiple description coding method based on set partitioning in hierarchical trees algorithm for color images [C]. International Conference on Machine Learning and Cybernetics, 2009: 2817-2822.
- [11] 丁学文. 视频通信错误检测及隐藏技术研究[D]. 天津:天津大学,2007.
- [12] BONNEAU R J, ABOUSLEMAN G P. Target-aided fixed-quality-of-service compression of SAR imagery for transmission over noisy wireless channels [C]. IEEE International Conference on Image Processing, 2002.
- [13] KARVONEN J, SINIL M. A wavelet transform coder supporting browsing and transmission of sea ice SAR imagery [C]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002.
- [14] GABAY A, KIEFFER M, DUHAMEL P. Joint source-channel coding using real BCH codes for robust image transmission [C]. IEEE Transactions on Image Processing, 2007.
- [15] XUE G D, HAO C X, ZHANG W B, et al. A novel error resilient joint source-channel coding scheme for image transmission over error prone channels [C]. International Conference on Broadband Network & Multimedia Technology, 2009.
- [16] 付炜,丁倩,孟维娜,等. 基于数字水印的形状错误隐藏[J]. 电子测量技术, 2007, 30(6): 139-142.
- [17] 周美丽,白宗文. 基于 HVS 的压缩域数字水印嵌入系统的设计[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(4): 78-80.
- [18] 姜祝. 基于小波域的 SAR 图像压缩算法研究[D]. 北京:中国科学院电子学研究所,2009.
- [19] 惠巧娟,李洪安,陆焱. 一种基于小波变换和人类视觉系统的图像压缩算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(12): 1838-1844.
- [20] 宫娜娜,刘岩波. 变换域图像压缩算法仿真及性能分析[J]. 电子测量技术, 2012, 35(9): 67-69, 73.
- [21] DUMITRESCU S, XU J. Efficient rate - distortion optimal packetization of embedded bitstreams into independent source packets [C]. IEEE Transactions on Image Processing, 2012: 2653-2666.
- [22] 刘洁瑜,刘贵忠,刘龙,等. 一种新的 JPEG2000 图像传输误码掩饰算法[J]. 西安交通大学学报, 2004, 38(8): 877-878.
- [23] DOMÍNGUEZ H D J O, SÁNCHEZ V G C, VILLEGAS O O V. Improved SPIHT algorithm [C]. 10th International Conference on Signal-Image Technology and Internet-Based Systems, 2014: 152-156.
- [24] 彭勃,胡访宇. 使用提升小波进行超分辨率图像重建[J]. 电子测量技术, 2010, 33(5): 66-68, 76.

## 作者简介

黄博阳,1992 年出生,硕士研究生,主要研究方向为遥感数据传输容错技术。

E-mail: prudent\_boy@163.com