

Fractal Features of Groundwater Monitoring Data Based on Wavelet Analysis

Mingliang Feng, Fengying Xue, Quanzhi Chen

Shaanxi Seismological Bureau, Xi'an Shaanxi
Email: 447565040@qq.com

Received: May 26th, 2015; accepted: Jun. 10th, 2015; published: Jun. 17th, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Earthquake prediction is mainly through observation and analysis of precursor data for a long time. The underground fluid data, as an important part of precursory data, have a very sensitive response to the process of birth and an earthquake precursor. By applying fractal theory to analyze underground fluid data, it can identify the abnormal of fluid data. This paper uses wavelet method study on fractal feature of underground fluid data, and through phase space coefficient distribution of underground fluid data, verifies fractal feature of precursor data self similarity.

Keywords

Underground Fluid Data, Wavelet Analysis, Fractal Characteristics, Self-Similarity

基于小波分析的地下流体监测数据分形特征研究

冯明亮, 薛凤英, 陈全智

陕西省地震局, 陕西 西安
Email: 447565040@qq.com

收稿日期: 2015年5月26日; 录用日期: 2015年6月10日; 发布日期: 2015年6月17日

摘要

长期以来,地震预报主要是通过观测和分析前兆数据进行的。而地下流体数据作为前兆数据的重要组成部分,对地震的孕育和发生过程有十分灵敏的前兆响应。将分形理论用于地下流体数据分析,从而可以更好的识别地下流体数据异常。本文利用小波方法对地下流体数据的分形特征进行研究,通过地下流体数据的相空间系数分布验证前兆数据自相似的分形特征。

关键词

地下流体数据,小波分析,分形特征,自相似性

1. 引言

地震前兆观测数据蕴含着丰富的地震活动异常信息,是地震预测的一个重要环节。随着地震监测技术的日趋完善,各级地震前兆台网收集了大量的前兆观测数据。但是由于这些异常信息,在种类和形态上往往具有不可重复性,如何更加有效地分析前兆数据、提取地震前兆异常信息成为地震预测领域的研究热点。

地下流体数据作为前兆数据的重要组成部分,对地震的孕育和发生过程有十分灵敏的前兆响应。据不完全统计,我国已积累地下流体震前异常的资料上千个,在近百个中强以上地震前观测到地下流体数据异常,异常数量约占我国各类前兆异常总数的 50% 以上。

为了将分形理论[1]引入地下流体数据分析和异常识别中,本文通过小波[2]分析对地下流体数据的分形特征进行研究,从而验证地下流体数据具有自相性的分形特征。首先对水氡、气氡等地下流体[3]原始数据进行线性插值,去除缺数、错误数据对整体数据的影响;然后通过模拟突变信号的奇异性(或非正则性)分析选取合适的小波基;最后利用小波分析对地下流体数据自相似的分形特征进行仿真研究。

2. 数据来源与分析方法

宝鸡上王流体台,位于陈仓区县功镇赵家河村,距宝鸡市约 30 公里,地理位置 N34°33', E106°56', 海拔高程 1050 米。该台泉点为一断层裂隙上升泉,含水层补给以大气降水为主,泉点 10 公里范围内无 100 万方以上的水库,周围无深层抽水和注水井。

周至县西关流体台位于陕西省西安市周至县县城西关,地处汾渭断陷盆地西安——周至凹陷西端,秦岭北缘大断裂与岐山——马召断裂的交汇地带。岩性为老第三系渐新统砂岩。

宝鸡上王流体台和周至县西关流体台,自投入观测以来,监测数据连续、完整、可靠,具有良好的映震效能。因此,本文数据选取为宝鸡上王流体台水氡和周至西关流体台的水位监测数据。

2.1. 小波分析

20 世纪 80 年代,分形理论和小波分析相继问世,它们对非线性数据分析具有独特优势。而将小波分析与分形理论相结合,能够更加深入的对前兆数据进行分析研究。

对小波母函数作平移和伸缩所得到的一簇函数称为小波基,可表示为:

$$\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (1)$$

式中, a 为尺度因子, 代表频率特性; b 为平移因子, 代表时间特性。小波变换就是在这一簇函数上的分解。信号 $x(t)$ 的连续小波变换表示为:

$$CWT_x(a,b) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)\Psi_{a,b}(t)dt \quad (2)$$

式中, CWT 是连续小波变换(Continuous Wavelet Transform)的缩写。在实际信号处理工作中需要对信号进行离散小波变换。最常用的离散方法是将尺度因子和平移参数按幂级数进行离散化, 即令 $a = a_0^j$, $b = na_0^j T_0$, 其中 a_0 、 T_0 为大于零的实常数, j 、 n 为整数。当尺度扩大 a_0^j 倍时, 意味着频率降低 a_0^j 倍。一般情况下, 取 $a_0 = 2$, $T_0 = 1$; 离散后的正交小波为

$$\Psi_{j,n}(t) = 2^{-j/2}\Psi(2^{-j}t-n) \quad (3)$$

在实际地下流体数据分析中, 通常采用 $a = 2^j$, 随着 j 的增加, 信号从高频向低频分解, 当 $j = 0$ 时, 信号为采用频率, $j = 1$ 时将频率二等分, 依次类推。从频谱角度看, 正交小波变换 $DWT_{j,n}$ 是将信号分解到一系列相互独立的频带上, 分辨率 j 反映了频带的位置和带宽。在分辨率为 $j-1$ 时, $A_{j-1}f(x) = A_j f(x) + D_j f(x)$, 它是由分辨率为 j 时的近似部分 $A_j f(x)$ 和细节部分 $D_j f(x)$ 之和构成。近似部分是系统主要的、低频的成分, 它给出了信号的特征; 而细节部分往往是信号局部的、高频的成分。

2.2. 分形理论及其特征

分形理论是非线性学科中的一个活跃数学分支, 其研究对象是有非线性系统产生的不光滑和不可微的几何形体, 对应的参数是分维, 分形是刻画混沌运动的直观几何语言, 是更接近现实世界的数学。分形理论由数学家 B. B. Mandelbrot (曼德尔布罗特) 在 20 世纪 70 年代中期创立的。

严格而且正式地去定义分形是一件非常复杂和困难的事情。最为流行的一个定义是: 分形是一种具有自相似特性的现象、图像或者物理过程。也就是说, 在分形中, 每一组成部分都在特征上与整体相似, 只不过是变小了一些而已。因此, 自相似性是分形的最重特征, 从心脏的跳动、变幻莫测的天气到股票的起落等现象, 无不具有近似的或统计意义上的自相似性。同样, 地下流体数据也具有自相似性, 本文将通过小波分析对地下流体数据的自相似性的分形特征进行研究。

2.3. 基于牛顿插值法的线性插值

在地震[4]监测中, 总是对某一物理量进行随时间变化(等间隔或不等间隔)的不断观测, 得到一系列离散的观测序列。但常由于仪器故障或其他原因漏测了一些数据, 或由于明显的过失误差或某种突然干扰使一些数据不可靠而无法使用, 从而造成数据的不连贯, 对数据分析造成困难。

因此, 本文首先将对地下流体原始数据采用牛顿插值法进行线性插值。图 1 为周至西关流体台水位(2011 年 3 月 1 日~2013 年 2 月 28 日数据)原始数据和牛顿插值法进行线性插值后数据对比图。通过图 1 可以得出, 经过牛顿插值法可以去除缺测、突跳等对观测数据的干扰影响, 从而使得观测数据连贯、准确。

3. 小波基函数的选取

奇异性是信号的重要特性, 奇异值是奇异性的重要反映。对信号进行奇异性分析, 计算奇异值能够找到信号的扰动和间断点。小波分析[5]方法作为多分辨率时频分析方法, 是对信号奇异值检测的有效方法。由于奇异性包含了其本质的信息, 故可以通过信号的奇异性(或非正则性)分析选取其小波基。

Lipschitz 指数表征了函数的奇异性, 函数在某点的 Lipschitz 指数越小, 说明该点的奇异性越大, 光滑程度很低。几种常见函数的 Lipschitz 指数值如表 1 所示。

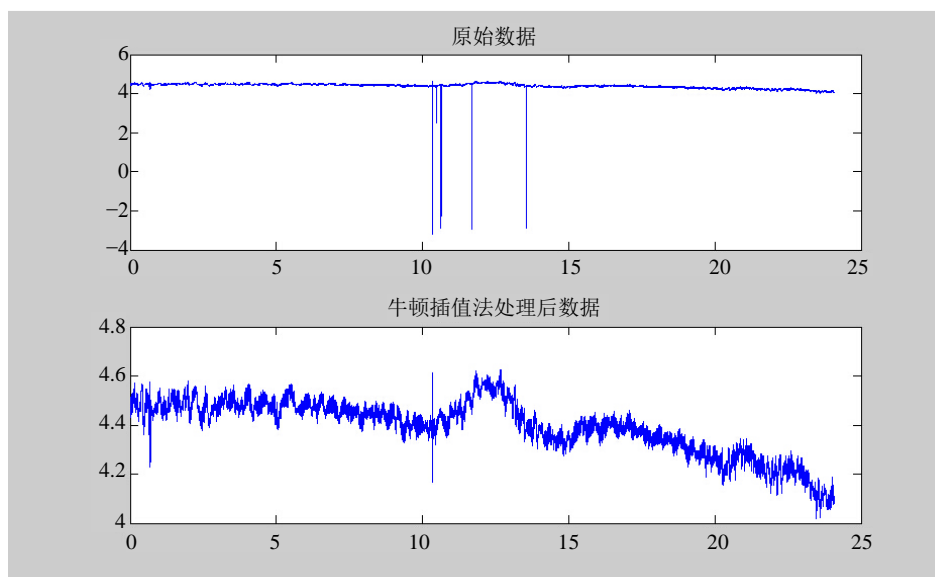


Figure 1. Comparison of data before and after Newton interpolation method treatment
图 1. 牛顿插值法处理前后对比图

Table 1. Typical signal Lipschitz index
表 1. 典型信号的 Lipschitz 指数

函数	正弦函数	斜坡函数	阶跃函数	脉冲函数	白噪声
Lipschitz 指数 α	3	1	0	-1	$-\frac{1}{2}-\varepsilon (\varepsilon > 0)$

由表 1 可以看出，信号的奇异性越大，其 Lipschitz 指数 α 越小。如果 $f(t)$ 在某点可导，则函数在该点的 Lipschitz 指数 $\alpha \geq 1$ ；如果函数 $f(t)$ 在某点不连续但有极值点，则函数在该点的 Lipschitz 指数 $0 < \alpha < 1$ 。

图 2~4 横坐标表示采样点，纵坐标表示测值。图 2 为模拟突变信号，采用不同的小波对该突变信号进行分解。图 3 选取的小波基函数为 Harr 小波，而图 4 选取的小波基函数为 db5 小波。

对分析结果图进行比较，可以发现图 3 并不能清楚的反应突变点的位置，而图 4 可以清楚的反应出突变点。因此选取合适的小波基对信号分解重构有重要影响。由于 db5 小波能够更好的保留原始数据的突变信息，因此本文选取 db5 小波对地下流体数据[6]的分形特征进行分析。

4. 地下流体数据分形特征分析

在小波分析的众多应用中，利用小波对检测信号进行自相似等分形[7]特征分析性越来越受到广泛的重视。

在小波变换中，理论上可以求得在信号上任意小尺度的小波分解系数，因此小波变换可以用来研究地下流体数据[8]的自相似性等分形的性质。在信号处理的意义上，自相似性指的是信号的某一部分在较高的分辨率下[9]采样的结果同信号整体在较低分辨率下的采样结果有一定的相似性。这很符合小波变换对任意尺度进行分解的特点，通过小波变换给出的相空间系数，很容易通过小波系数的分布找到信号的自相似性。

以宝鸡上王流体台水氡[10]测值和周至地震台水位[11]测值作为分析对象，利用选取好的 db5 小波对其作一维连续小波变换，变换尺度选取从 1 到 64，则相空间系数分布如图 5 和图 6 所示。

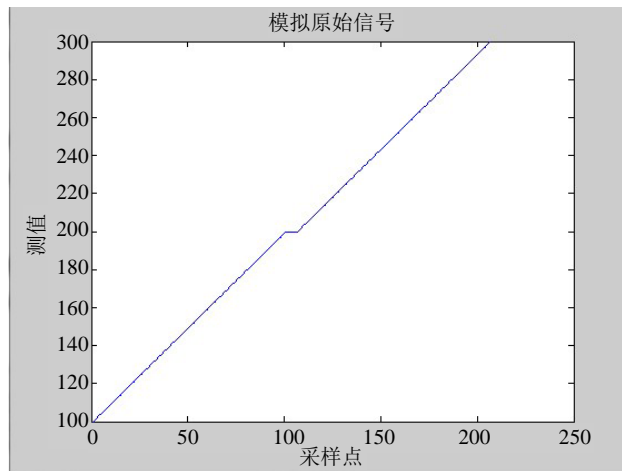


Figure 2. Analog signal mutation
图 2. 模拟突变信号

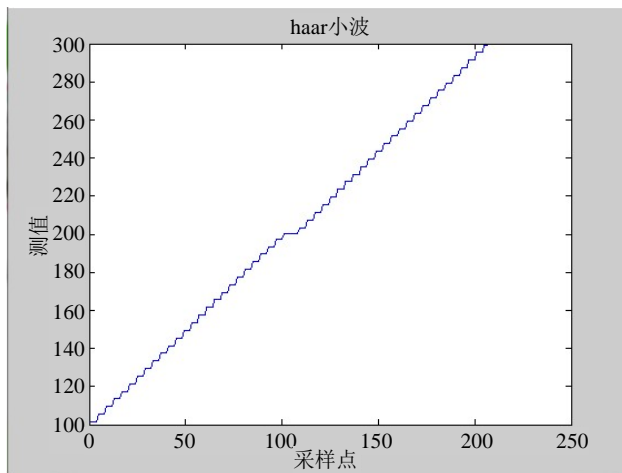


Figure 3. Haar wavelet decomposition and reconstruction of signal
图 3. Haar 小波分解重构信号

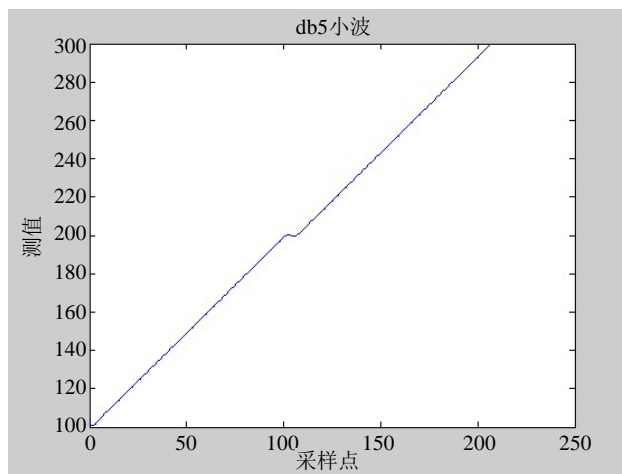


Figure 4. Db5 wavelet decomposition and reconstruction of signal
图 4. Db5 小波分解重构信号

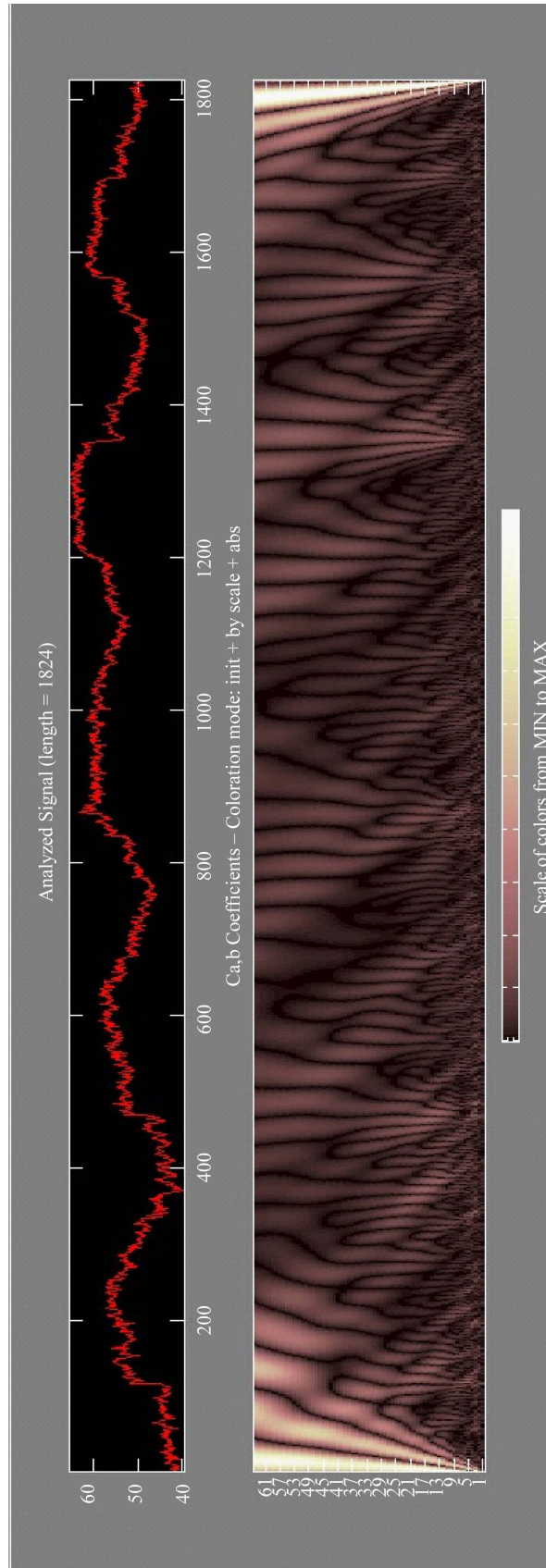


Figure 5. The water radon wavelet coefficient distribution map of Baoji Shangwang fluid station

图 5. 宝鸡上王流体台水氡小波系数分布图

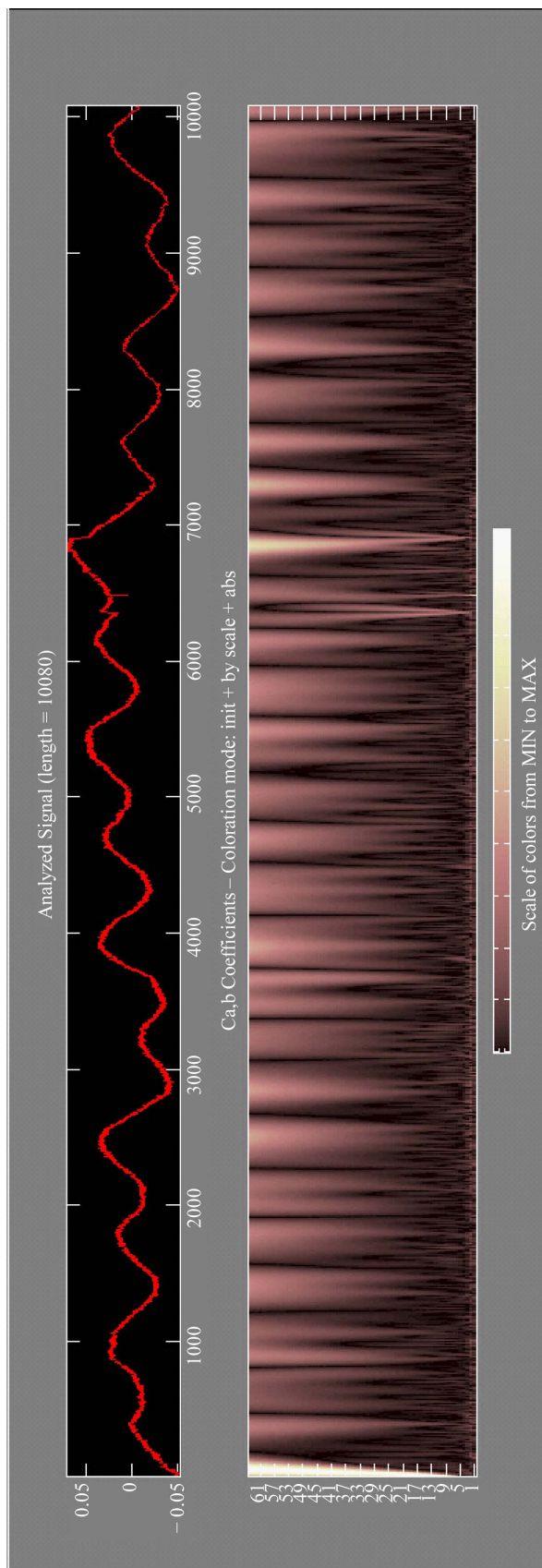


Figure 6. The water level wavelet coefficient distribution map of Zhouzhi fluid station
图 6. 周至地震台水位小波系数分布图

由图 5 和图 6 可看出, 下部线条较暗、较细, 而上部线条较亮、较粗, 从而说明如果小波分析的尺度越大, 则该数据的自相似分形特征就越明显。这是因为尺度大, 分辨率就高, 可以更清楚的看出数据的自相似性。同时对比图 5 和图 6, 可发现图 6 的线条粗细变化更加规律, 说明它的自相似分形特征更明显。因此, 更好采样率的数据, 则自相似性更好。

5. 结论

本文通过对宝鸡上王流体台水氡和周至西关流体台的水位监测数据自相似的分形特征进行仿真研究, 得出如下结论:

- 1) 通过分析地下流体数据的相空间系数分布, 可知水氡、气氡、水位等地下流体数据具有比较明显的自相似性;
- 2) 通过分析宝鸡上王流体台水氡测值和周至西关流体台水位测值的相空间系数分布图, 可发现若小波分析尺度越大, 则数据的自相似分形特征就越明显;
- 3) 通过对比宝鸡上王流体台水氡测值和周至西关流体台水位测值的相空间系数分布图, 可发现若地下流体原始数据采样率越高, 则该数据的自相似分形特征就越明显。

基金项目

陕西省地震局启航与创新基金。

参考文献 (References)

- [1] 李水根, 吴纪桃 (2002) 分形与小波. 科学出版社, 北京.
- [2] 李建平, 唐远炎 (1999) 小波分析方法的应用. 重庆大学出版社, 重庆.
- [3] 兰双双, 迟宝明 (2011) 汶川地震前地下水位固体潮加卸载响应比异常分析. *地震研究*, **3**, 271-277.
- [4] 郭安宁, 郭增建, 焦娇 (2012) 青海玉树 7.1 级大震的预测讨论. *西北地震学报*, **1**, 39-43.
- [5] 张樑 (2005) 小波分析与分析方法在水电站振动信号处理中的应用研究. 天津大学, 天津.
- [6] Grassberger, P. and Procaccia, J. (1984) Dimensions and entropies of strange attractors from a fluctuating dynamics approach. *Physica D*, **13**, 34-54.
- [7] 洪时中, 洪时明 (1987) 分数维及其在地震科学中的应用前景. *四川地震*, **1**, 39-46.
- [8] 张清秀, 陈莹, 陈懿德, 等 (2012) 采用相关分析法研究降雨对水位的影响. *华南地震*, **2**, 107-114.
- [9] 敬少群, 王佳卫, 童迎世 (2002) 小波变换在少震、弱震区地下水位数据分析中的应用. *华南地震*, **2**, 9-15.
- [10] 焦娇, 郭安宁 (2012) 水库区地震前兆在地震预报中的意义. *西北地震学报*, **3**, 89-93.
- [11] 张昱, 刘小凤, 常千军, 等 (2012) 甘肃省氡观测资料地震监测效能评估及其结果分析. *华南地震*, **1**, 22-30.