

密级: _____



中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences

硕士学位论文

Global observation of PKiKP and its coda, implying heterogeneous
structure of the inner core

作者姓名: _____ 龙鑫

指导教师: _____ 艾印双 研究员

学位类别: _____ 理学硕士

学科专业: _____ 固体地球物理学

研究所: _____ 中国科学院地质与地球物理研究所

2016 年 6 月

**Global observation of PKiKP and its coda, implying heterogeneous
structure of the inner core**

**By
Long Xin**

**A Dissertation/Thesis Submitted to
The University of Chinese Academy of Sciences
In partial fulfillment of the requirement
For the degree of
Master of Science**

**Institute of Geology and Geophysics
Chinese Academy of Sciences**

June, 2016

关于学位论文使用权声明

任何收存和保管本论文各种版本的单位和个人，未经著作权人授权，不得将本论文转借他人并复印、抄录、拍照、或以任何方式传播。否则，引起有碍著作权人著作权益之问题，将可能承担法律责任。

关于论文使用授权的说明

本人完全了解中国科学院地质与地球物理研究所有关保存、使用学位论文的规定，即：中国科学院地质与地球物理研究所有权保留学位论文的副本，允许该论文被查阅；中国科学院地质与地球物理研究所可以公布该论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存该论文。

（涉密的学位论文在解密后应遵守此规定）

签 名：

导师签名：

日 期：

关于学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文是本人在导师指导下，独立进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人享有著作权的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。

签 名：

导师签名：

日 期：

摘 要

从实际的稠密台阵中抽取各种几何形态和台间距不同的子台阵,运用 PWS 等标准台阵叠加技术,比较不同类型的子台阵对与内核相关的一系列弱震相 (如前临界 PKiKP、PKIIKP 和 PKJKP 等) 提取的效果;然后通过理论模拟各种不同台阵的情形,进行叠加,将理论模拟的最佳结果和使用实际资料叠加的结果进行比较。若能找到最优的配置方法,则对今后以观测与内核相关的弱相位为目的的地震台阵布设具有一定的指导作用。

关键词: 台阵; 叠加; PWS; 弱震相; 内核

Abstract

I collect global data set from short period IMS arrays, from which waveform quality of each station is relatively high and records last several decades for their nuclear detection purpose, and Hi-net which is extremely dense. I attempt to use those data and apply array stacking technique like PWS to detect and identify the inner core relevant weak phases. I also plan to figure out a best array configuration for the signal extraction, which is mainly affected by geometrical distribution of stations and slowness of a given phase using real data and theoretical stimulation, and consider to determine a proper array size that would be sufficient to provide a good SNR for the phase extraction. The result of this research would be a guidance for future devise of seismic array aimed to study the inner core properties using weak inner core phases.

Keywords: Array;Stack;PWS;Weak Phases;Inner Core

目 录

摘 要	I
Abstract	III
目 录	V
第一章 Data and Observation	1
1.1 Observation of Global subcritical PKiKP	1
1.1.1 Data	2
1.1.2 Observation from global IMS stations	3
1.1.3 Observations from dense regional network	9
1.2 PKiKP Precursor	10
1.3 PKiKP Coda	11
1.3.1 Northern America	11
1.3.2 Australia	14
1.3.3 Asia	17
1.3.4 Conclusion about PKiKP coda observation	18
参考文献	19

第一章 Data and Observation

1.1 Observation of Global subcritical PKiKP

自地球内核被发现以来 (Lehmann, 1936) 已经过去将近 70 年, 正是由于在之前被认为是内核影区的地方发现了来自内核的绕射震相, 即后临界 PKiKP, 才证实了内核的存在。但是由于内外核界面反射系数较小, 相比与其他界面的反射震相如 PcP, 前临界 PKiKP 的振幅很微弱, 一般为 PcP 振幅的数十分之一, PKiKP 的十分之一左右 (Bolt and O'Neill, 1965), 要观测到它需要很高的信噪比, 这对仪器和环境的要求也就随之提高。在内核的存在被证实后的几十年, 作为其存在更为直接证据的前临界 PKiKP 的观测都没有报道。上世纪 70 年代, 随着地震台阵的发展, 有关前临界 PKiKP 的观测结果才开始出现 (Engdahl et al., 1970)。但在单道上观测前临界 PKiKP 非常困难, (Shearer and Masters, 1990) 在数万道记录中也只找到两个疑似的 PKiKP 相位, 即使在 PKiKP 理论到时附近存在一个大于噪声级别的振幅, 也难以断定其就是 PKiKP 相位。

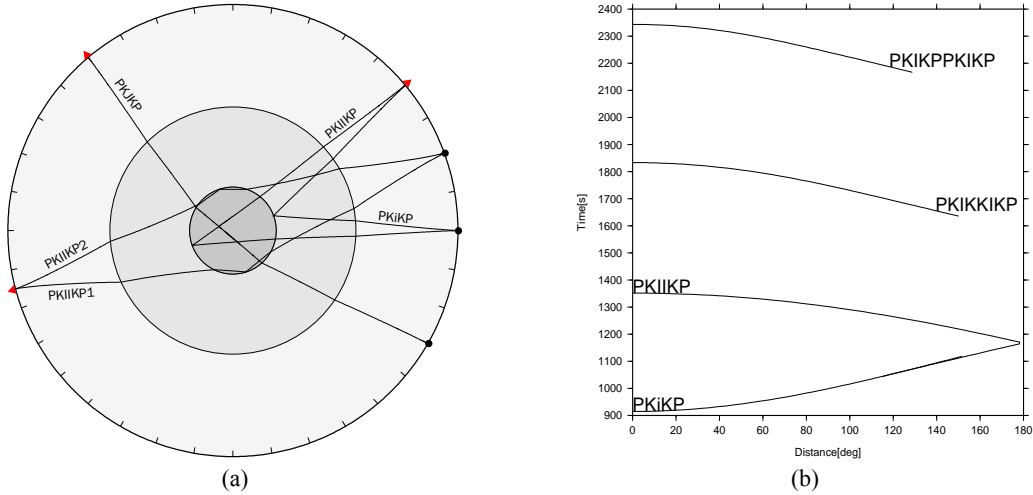


图 1.1 Seismic phases which sample inner core, and their travel time curve.

要得到确定性的前临界 PKiKP 观测必须要用到台阵, 而目前用来寻找前临界 PKiKP 的台阵又分为两种, 其一是微型台阵, 口径从几公里到十几公里, 例如 IMS 台阵; 其二是区域密集型台阵, 口径数百公里, 台站数量在几百个左右, 典型的有 Hi-net、USArray 和阿拉斯加区域台网等。微型台阵虽然台站数量少往往在十个左右, 但是能够用于快速寻找微弱震相。因为就台阵口径而言, 传播到台阵上的波已经可以看作平面波, 即可以认为每个台站接收到的是同一信号, 如果在每个台站上都能看到这个相位, 这就排除了特定区域的随机噪声的因素。而且当台站间距足够小的时候, 直接将所有信号直接相加就足以起到提高信噪比的作用; 大口径密集台阵的优势在于, 台阵的数量还有其震中距

的跨度，即增大了发现某一地震产生的前临界 PKiKP 相位的概率，如果台站足够多，则能得到足够数量的 PKiKP 观测，再通过慢度分析就可以确定信号的来源。

最早使用微型台阵寻找前临界 PKiKP 的是 Souriau and Souriau (1989)，利用 WRA 台阵并运用叠加方法观测到了 PKiKP，由于年代较早，受限与仪器等因素，并没有在单道上看到清晰的、高信噪比的 PKiKP 相位。在十多年后，Koper et al. (2003) 利用全球的 IMS 微型台阵从 1995 至 2000 年间的的海数据，用台阵方法找到了数百对的 PKiKP 和 PcP 波形；而 Kawakatsu (2006) 则利用 Hi-net 近 700 个台站的数据，观测到了自同一事件的清晰的前临界 PKiKP，通过慢度分析和波形拟合，有力地证实了存在尖锐的 ICB。值得注意的是，虽然相比于较早的研究，更多的前临界 PKiKP 已经被发现和确认，但数据覆盖依然有限，可以看出，Koper et al. (2003) 的研究中 PKiKP 在 ICB 反射点的分布主要集中在环太平洋区域，欧亚大陆下方的 ICB 则没有覆盖，而且 PKiKP 虽然数量增多，但很多来源与相邻的地震，其在 ICB 的采样点的并不具有均匀的分布，因此之前的研究未能给出 ICB 全球范围的特征，区域的 ICB 特征也不能给出清晰的全球范围的动力学指示。

1.1.1 Data

本文除了用到先前研究所用到的 IMS 台阵的数据，还增加了中亚哈萨克斯坦、苏格兰、中欧还有北欧的 IMS 小台阵数据，而且澳大利亚及美国的 IMS 台阵也有所增加，所有 IMS 台阵的数据均从 Iris 数据中心获得，但先前研究用到的 CMAR 和 KSAR 等台阵的数据不能获取。所用到的台阵数据如下：澳大利亚的 ASAR(2012-2013)、WRA(2010-2012)、PSAR(2012-2015)；北美的 BCAR、BMAR 和 IMAR(2013.11-2015.5)，YKA(2013.7-2014.11)，NVAR(1998-2014)，ILAR，TXAR，PDAR；哈萨克斯坦的 ABKAR，KKAR，MKAR；德国的 GERES；罗马尼亚的 BURAR；苏格兰的 EKB；挪威的 SPB。所有的地震事件均选取 5 级以上，震中距从 10 到 70 度，震源深度没有限制。所有的 IMS 台站数据均通过 1-2Hz 的滤波，所有的事件均通过手工挑选，保证数据的质量。观测到的 PKiKP 的事件与台阵分布如图 1.2，其中包含了每道都具有清晰的 PKiKP 相位的观测和需要叠加才能看到清晰 PKiKP 相位的观测。可以看到 PKiKP 的 IMS 台阵的震中距主要集中在 20 ~ 40 度之间，这也是前临界 PKiKP 在 ICB 反射系数最大的区间。

除了小口径台阵，这里还增加了部分阿拉斯加区域台网 AK、USarray 以及 Hi-net 的数据，观测到 PKiKP 相位的震中距范围在 10 至 50 度之内。在之前的研究中除了在 Hi-net 上，很少有在其他台网上观测到 PKiKP 的报道，追究其原因可能是，对于密集台站的台网，从大量的事件中寻找某个能产生可观测到的 PKiKP 信号很困难，这需要进行大量的数据挑选。如果台站数量达到数百个，几千个事件就会有数十万道数据的挑选工作量，但其中可能仅有数十个事件产生的 PKiKP 震相能被清晰地观测到。由于 PKiKP 的振幅受

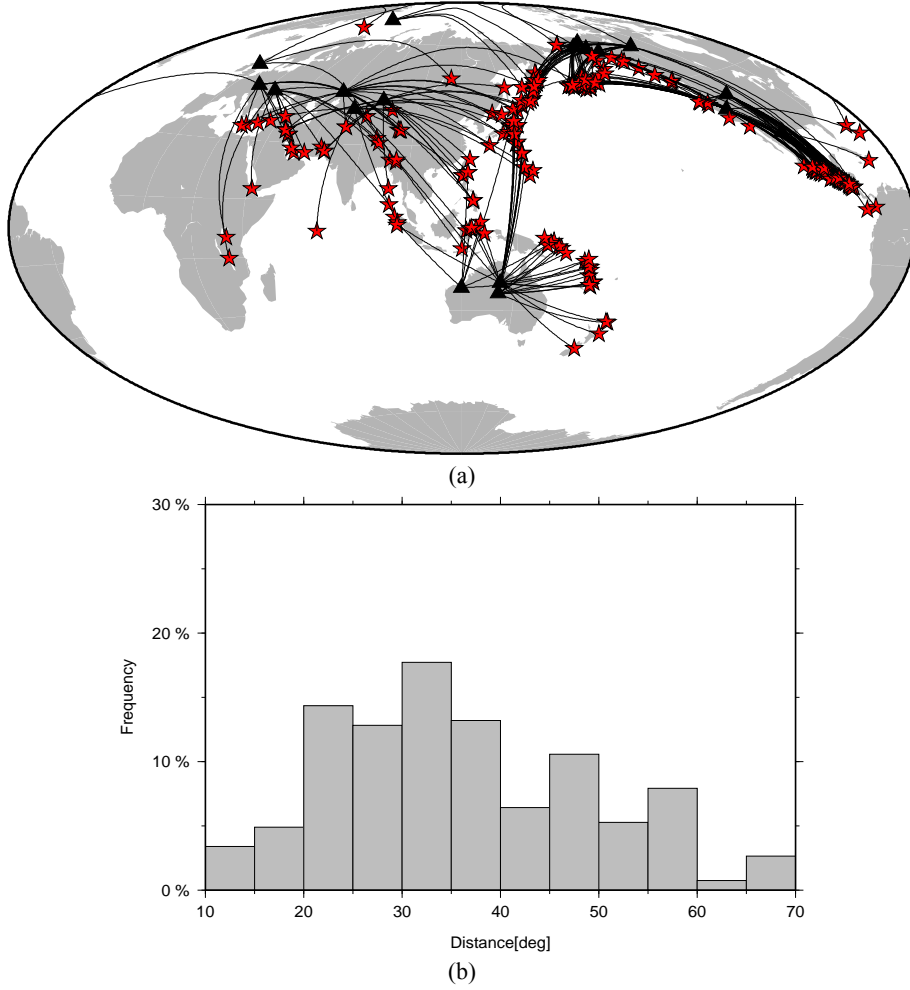


图 1.2 (a) 观测到 PKiKP 的 IMS 小口径台阵和事件的全球分布。红色五角星表示地震，黑色三角形表示台阵，黑线表示射线路径的投影。(b) 所有观测到 PKiKP 的 IMS 台阵数随震中距的分布直方图。

到的影响包括 (1) 震源辐射花样；(2) PKiKP 射线在 ICB 反射点的性质；(3) 震源到台站路径所经过的结构效应，观测到清晰 PKiKP 相位需要合适的条件。因此这里提供一种能快速找到大量 PKiKP 相位的方法，即先用 IMS 小口径台阵搜索出能产生清晰观测的事件，这些事件就是符合产生可观测到的前临界 PKiKP 震相条件的，然后用附近的密集台阵数据针对某一事件搜寻 PKiKP 震相，这样能显著提高搜索的效率。这里就用这种方法，在 AK 和 USArray 上找到了数十道清晰的 PKiKP 相位，震中距的跨度甚至能超过 20 度，这些是之前的研究从未观测到的结果，关于它们的情况，后面会再次提到。

1.1.2 Observation from global IMS stations

下面给出全球 IMS 台阵观测到的清晰 PKiKP 记录的例子，作为对照，同时附上 PcP 的记录。

1.1.2.1 YKA

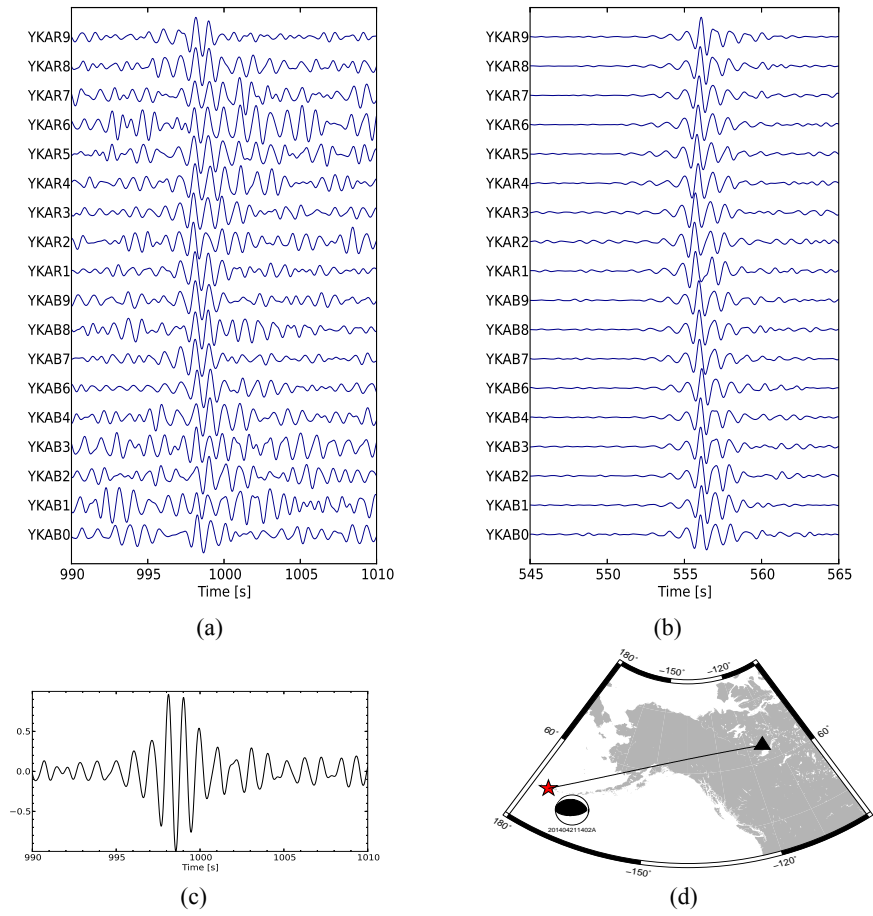


图 1.3 (a)YKA 台阵的 PKiKP 记录 (b)PcP 所有单道记录 (c) 线性叠加后的 PKiKP 波形 (d) 事件和 YKA 台阵的位置关系, 和地震的震源机制。

1.1.2.2 NVAR

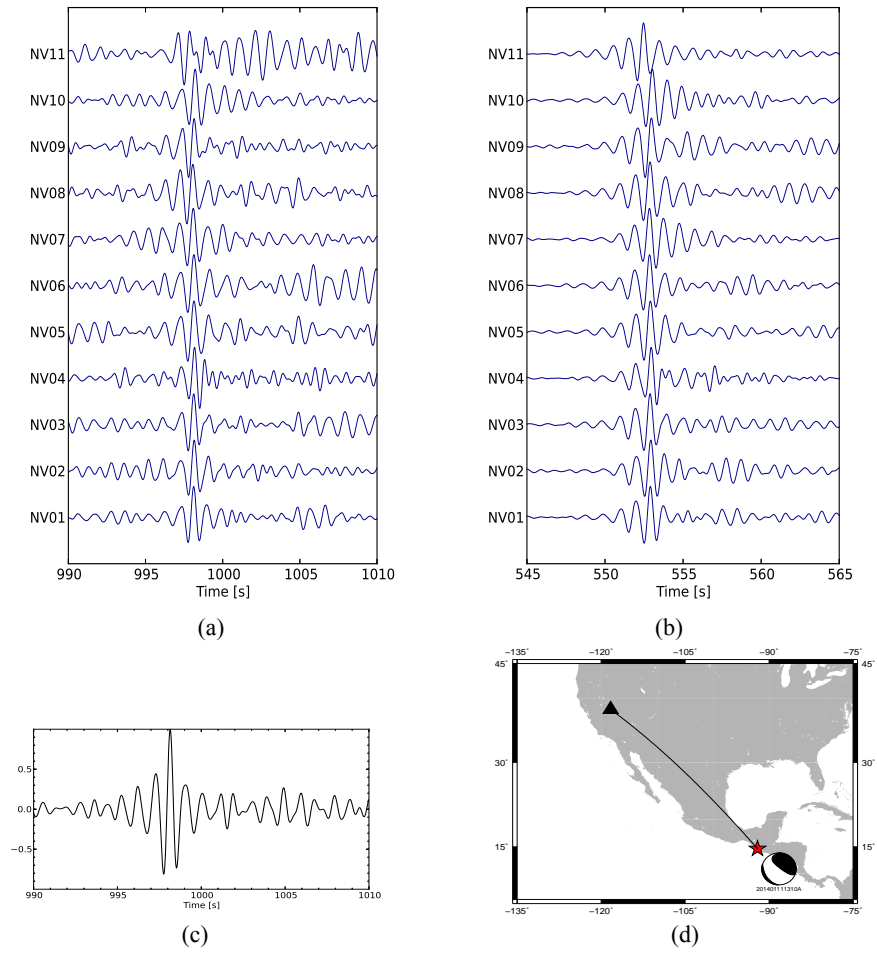


图 1.4 (a)NVAR 台阵的 PKiKP 记录 (b)PcP 所有单道记录 (c) 线性叠加后的 PKiKP 波形 (d) 事件和 NVAR 台阵的位置关系，和地震的震源机制。

1.1.2.3 WRA

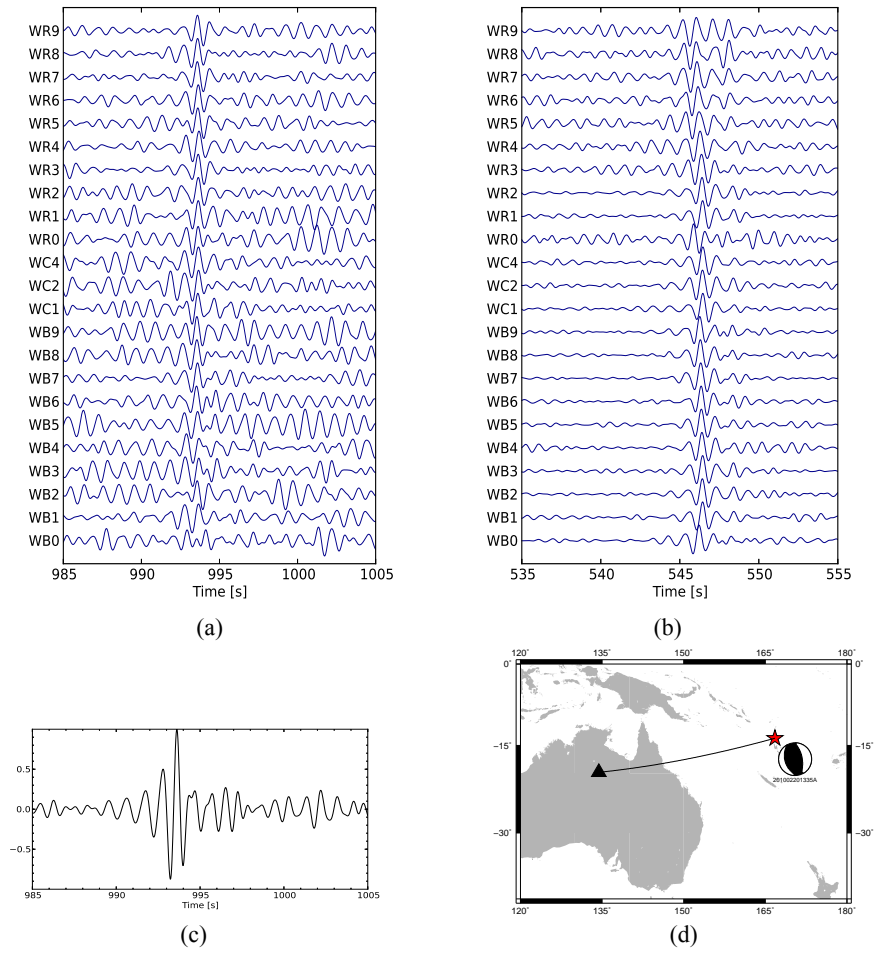


图 1.5 (a)WRA 台阵的 PKiKP 记录 (b)PcP 所有单道记录 (c) 线性叠加后的 PKiKP 波形 (d) 事件和 WRA 台阵的位置关系，和地震的震源机制。

1.1.2.4 ABKAR

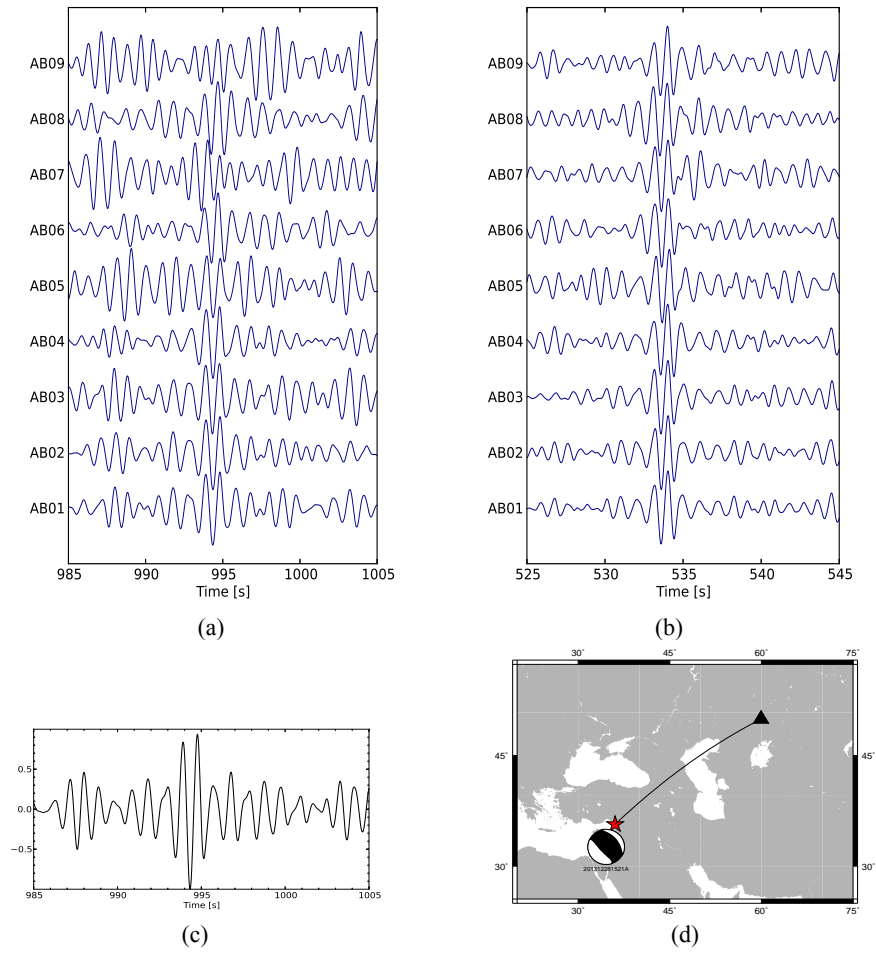


图 1.6 (a)ABKAR 台阵的 PKiKP 记录 (b)PcP 所有单道记录 (c) 线性叠加后的 PKiKP 波形 (d) 事件和 ABKAR 台阵的位置关系，和地震的震源机制。

1.1.2.5 GERES

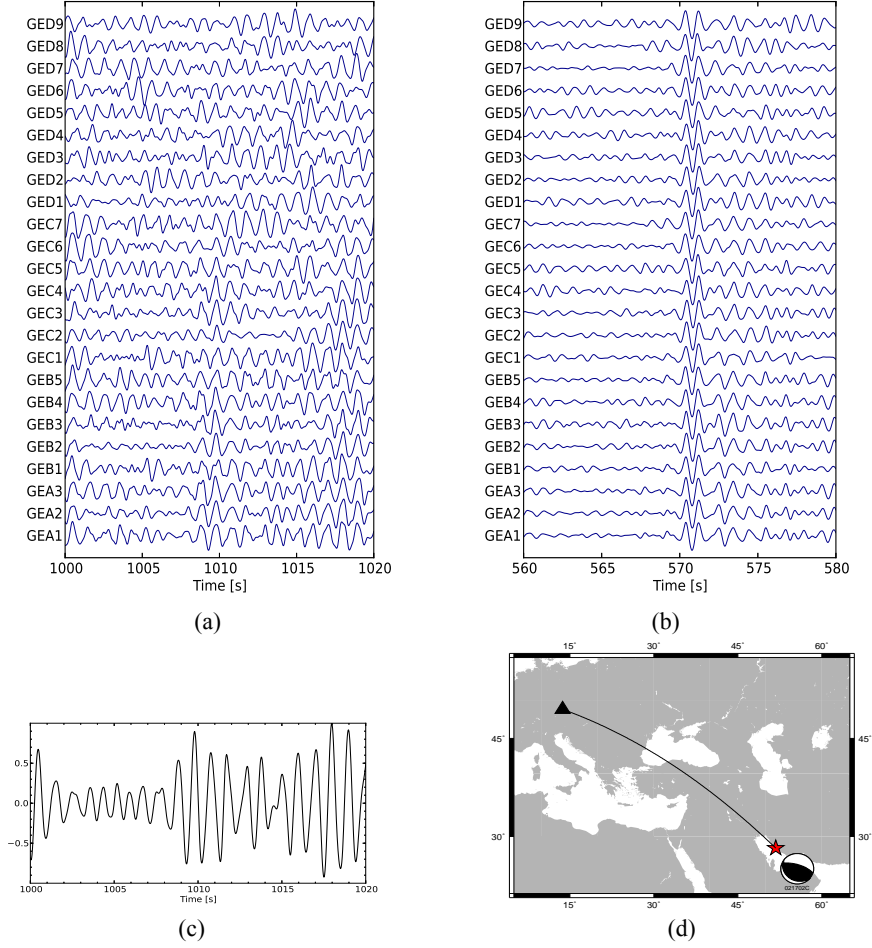


图 1.7 (a)GERES 台阵的 PKiKP 记录 (b)PcP 所有单道记录 (c) 线性叠加后的 PKiKP 波形 (d) 事件和 GERES 台阵的位置关系, 和地震的震源机制。

在欧洲大陆台阵观测到的 PKiKP 振幅均很弱, 从图 1.7 中德国 GERES 台站的记录可以看到, 虽然具有很清晰的 PcP 相位, 但 PKiKP 几乎淹没在噪声中, 仅仅是根据每道中波形的相似性判断出 PKiKP 的存在, 而且并不是所有的台站都能看到这个信号, 在叠加的 PKiKP 波形之后还存在一段较大振幅的尾波。

1.1.3 Observations from dense regional network

1.2 PKiKP Precursor

1.3 PKiKP Coda

到目前为止的地震学观测表明, 内核并不是一个均匀的球体, PKP 和 PKiKP 走时的观测 (Creager, 1992) 和自由振荡的观测 (Tromp, 1993) 都支持其内部存在各向异性; 由赤道向路径的 PKiKP 和 PKP 走时观测也表明内核存在东西半球的地震波速差异 (Tanaka and Hamaguchi, 1997), 即内核存在 1-Degree 尺度的不均匀性。同时内核也被认为存在强烈的衰减, 但目前的研究主要考虑的是内核粘弹性造成的真实衰减, 由于内核不均匀的尺度仍不确定, 散射衰减对经过内核的体波总体衰减的贡献也不清楚。之前的研究 (Vidale et al., 2000) 认为 PKiKP 的尾波来自外层内核不均匀体的散射, 且散射体的尺度约为 2km。后续区域性的 (Poupinet and Kennett, 2004) 和全球范围的 PKiKP 尾波研究 (Koper et al., 2004) 均观测到了持续 200s 左右的 PKiKP 尾波, 且认为尾波来自于内核的散射。

这里结合全球范围内近十年的数据, 对全球范围内观测到的 PKiKP 尾波进行分析。PKiKP 的尾波的可能来源并不唯一, 除了内核成因, 其也可能来自地幔和地壳的散射。之前的研究通过对比 PcP, ScP 和 PKiKP 的尾波的差异来排除尾波地幔成因 (Koper et al., 2004), 然而即使是小震中距, PcP 和 PKiKP 的路径在地幔中仍有较大的差异, 尤其是在下地幔附近, 因此为了确定尾波的来源还需要其他区的参照。下面采用的方法是 (1) 同一事件不同区域台阵接收到的信号; (2) 同一个台阵的 PcP, ScP 和 PKiKP 尾波的比较; (3) 台阵接收到的发生在同一区域的不同地震的 PKiKP 波形的比较。

1.3.1 Northern America

2014/06/23 在 ALEUTIAN 群岛的事件 (51.95N 178.58E, Depth 106, MB 6.0), 产生的 PKiKP 相位同时被位于北美的 BCAR, IMAR, BMAR, YKA, NVAR 和 PDAR 等多个 IMS 台阵接收到, PKiKP 采样位于阿拉斯加附近下方的 ICB。图 1.8 显示了地震与 IMS 台阵的位置, 以及 PKiKP 内核反射点的投影。

分别对 NVAR 台阵每道数据进行 1-2HZ 和 2-3HZ 频带范围的滤波, 可以看出 PKiKP 的尾波和 PKiKP 主相位的能量均集中在 1-2HZ 内, 在 2-3HZ 范围内滤波后 PKiKP 被滤掉, 每道的振幅为 1-2HZ 数十分之一 (图 1.9), 且紧随着 PKiKP 后面的尾波部分的振幅接近前后的噪声级别。在 1175s 左右似乎存在一个突然出现的能量, 而且在提高滤波频率后, 振幅变得更加清晰, 这是否是某个特殊的相位还有待确认。

与之前的研究不同, 对于这个事件, NVAR 台阵上观测到的 PKiKP 尾波的持续时间不到 100s, 而且在 PKiKP 后续 50s 内, 存在连续的峰值, 振幅可以与 PKiKP 主相位相当。对 PcP, ScP 和 PKiKP 分别进行波包叠加的结果如图 1.10, 可以看出三者的尾波形态存在明显的差异。PcP 的尾波在 PcP 最大振幅后直接衰减, ScP 和 PKiKP 在主相位后立刻出

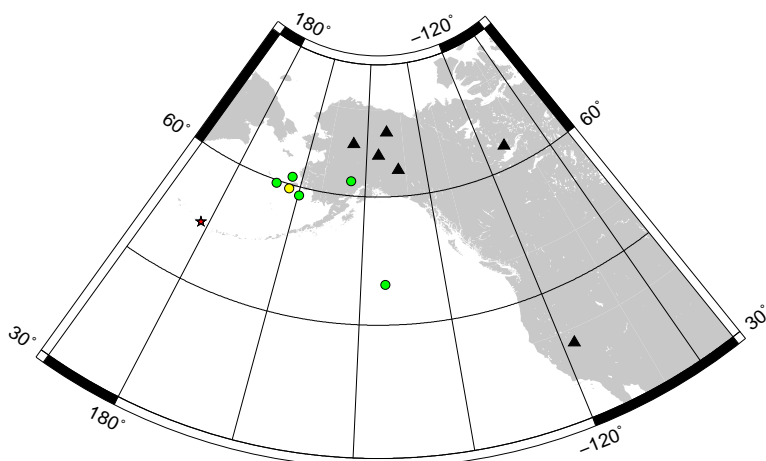


图 1.8 2014/06/23 22:29:51 发生在 ALEUTIAN 群岛的事件 (51.95N 178.58E, Depth 106, MB6.0) 和 IMS 台阵的位置。黑色三角形表示 IMS 台阵 ILAR, BCAR, IMAR, BMAR, YKA, NVAR 和 PDAR, 红色五角星表示地震位置, 圆圈表示在 ICB 反射点的投影, 其中绿色表示观测到有 PKiKP, 黄色表示未观测到 PKiKP 的台阵 ILAR 对应的反射点。

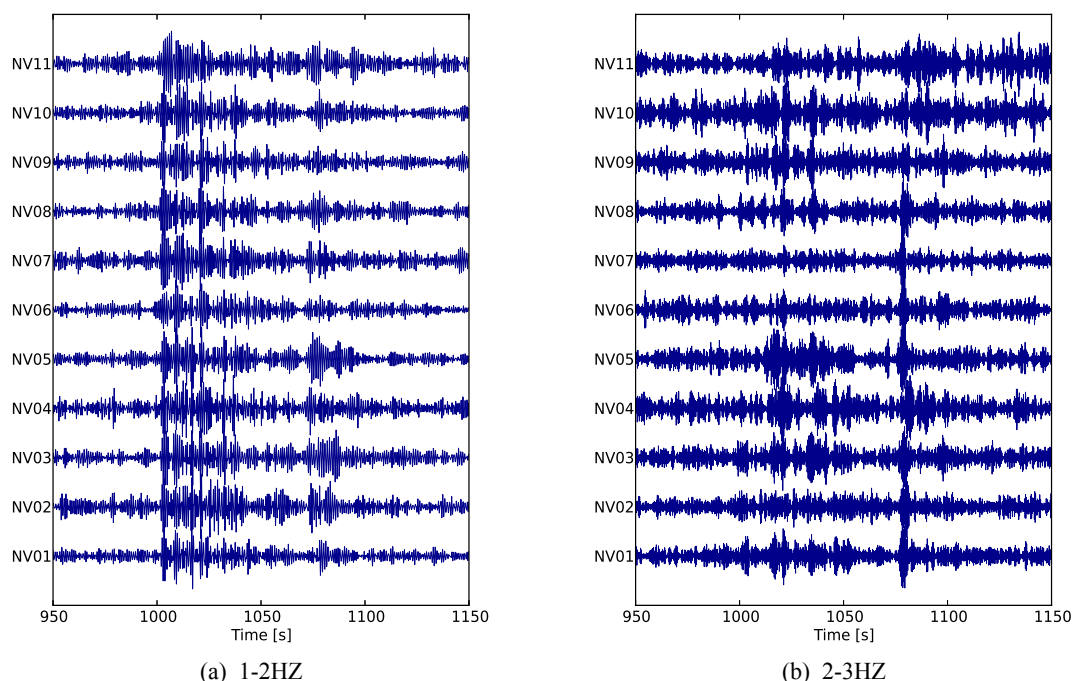


图 1.9 NVAR 台阵记录的 ALEUTIAN 群岛事件的 PKiKP 尾波 (a) 经过 1-2HZ 滤波的结果 (b) 经过 2-3HZ 滤波的结果。

现一个很大的振幅, 但其后 ScP 尾波逐渐衰减到噪声级别, 而 PKiKP 尾波振幅仍然持续到后 80s 左右。这说明, PKiKP 的尾波与 PcP 和 ScP 的可能来源于不同的深部结构。

在这些能观测到清晰 PKiKP 相位的 IMS 台阵中, 只有在 NVAR 发现了明显的尾波, 且尾波紧随 PKiKP 主相位, 其线性叠加和 PWS 叠加的结果见图 1.11; 其他台阵上均没有发现类似的现象, PKiKP 均较为清晰, 且没有续至相位, 见图 1.12, 这很大程度上排除

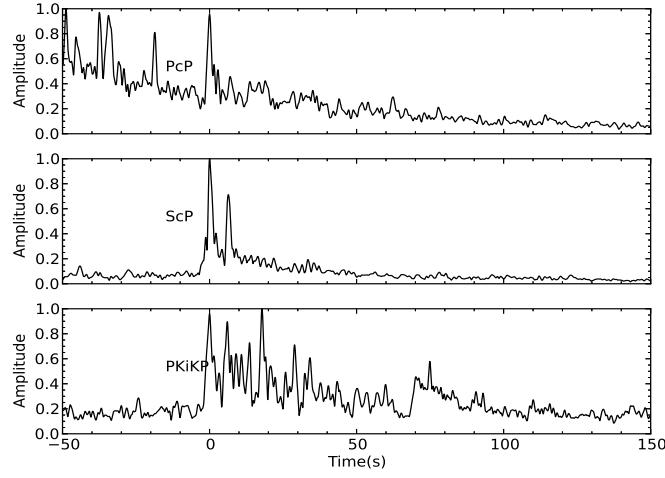


图 1.10 PcP,ScP,PKiKP 的尾波波包对比，每道均按照理论的慢度进行叠加，最后再按主相位最大波包振幅归一化。

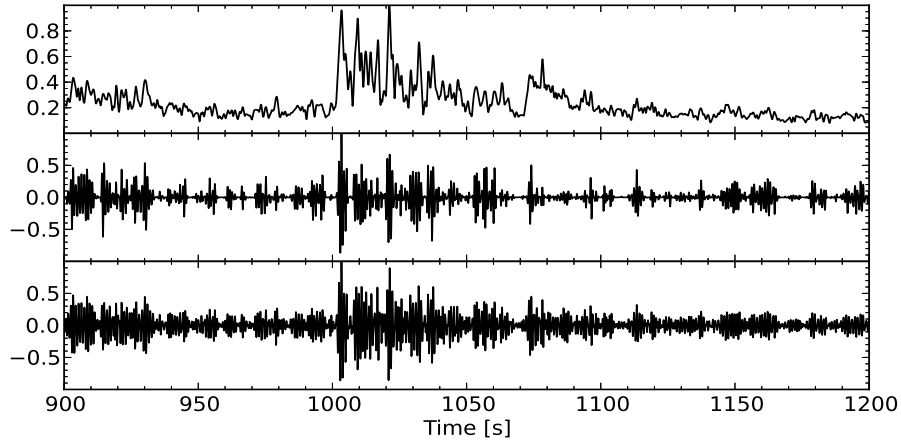


图 1.11 NVAR 台阵对 2014/06/13 事件的 PKiKP 及其尾波的叠加结果，均根据理论慢度进行叠加。上部为波包叠加 (与图 1.10 中的相同)，中为相加权叠加 (PWS), 下为线性叠加，均能看到清晰的 PKiKP 和其后续的尾波。

了后续的尾波来自于震源一侧，例如在震源侧反射的深度相位；对于没有观测到 PKiKP 相位的台阵 ILAR，在 PKiKP 理论到时后也没有大于噪声级别的振幅。在叠加的 PDAR 台阵的 PKiKP 波形中，大约在主 PKiKP 相位后 5s 出现一个续至相位的振幅，这与叠加的 NVAR 台阵波形一致。由于 PDAR 和 NVAR 相距较近，且相对与事件的震中距都在 45° 左右，这个相位可能是来源与地壳，但 NVAR 后续的应该来自于更深的地方。在震中距为 60° 的 TXAR 台阵，既没有观测到直达的 PKiKP 相位也没有观测到任何尾波存在的迹象。值得注意的是 NVAR,PDAR 和 TXAR 有较为接近的方位角，分别为 $81.4^\circ, 71.2^\circ$ 和 79.6° 。

令人感到疑惑的是，一小时前在该事件发生处附近的另一个事件 (21:11:40,51.95N

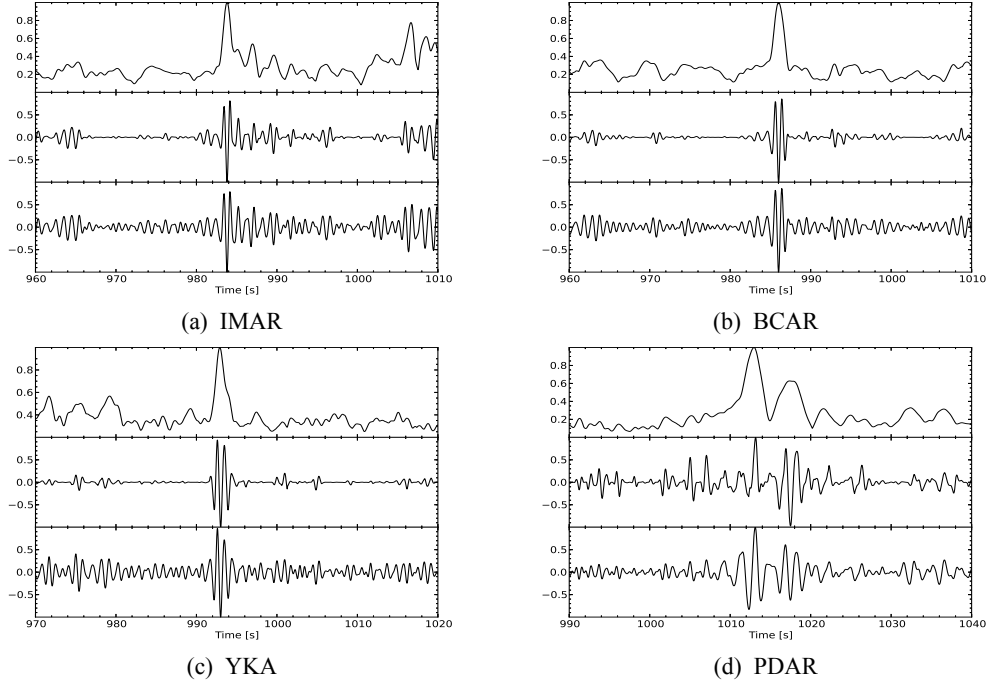


图 1.12 IMAR,BCAR,YKA,PDAR 台阵观测到的 PKiKP 相位, 上为波包叠加, 中为 PWS 叠加, 下为线性叠加。震中距分别为, 19.7° , 23.5° , 36.0° , 47.7° 。

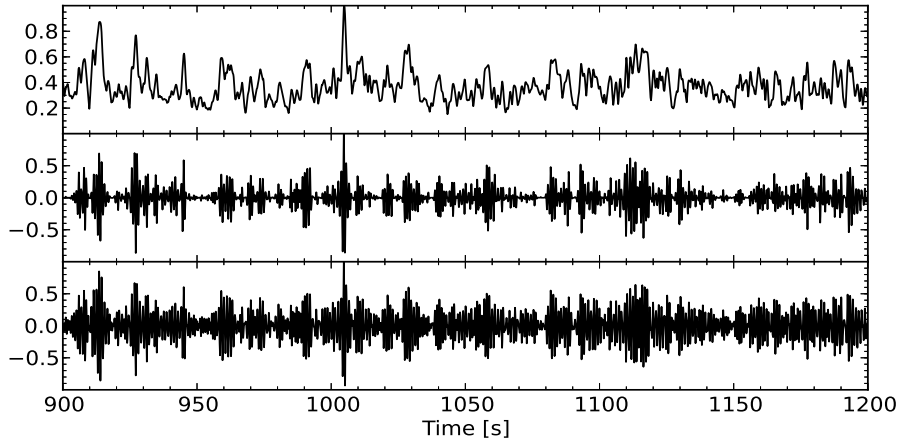


图 1.13 NVAR 台阵对 2014/06/23 前一个事件的 PKiKP 及其尾波的叠加结果, 均根据理论慢度进行叠加。上部为波包叠加, 中为相加权叠加 (PWS), 下为线性叠加, 可以看见明显的 PKiKP, 但没有明显的尾波。

178.45E) 深度 103km, 震级与后者相同, 但 NVAR 并没有记录到与该事件类似的 PKiKP 尾波 (图 1.13)。

1.3.2 Australia

本文的尾波分析在澳大利亚一共用到了三个小口径台阵的数据, 分别是 WRA、ASAR 和 PSAR, 它们在之前的研究中也用到, 这里增加了一个螺旋形的 PSAR 台阵。在这些

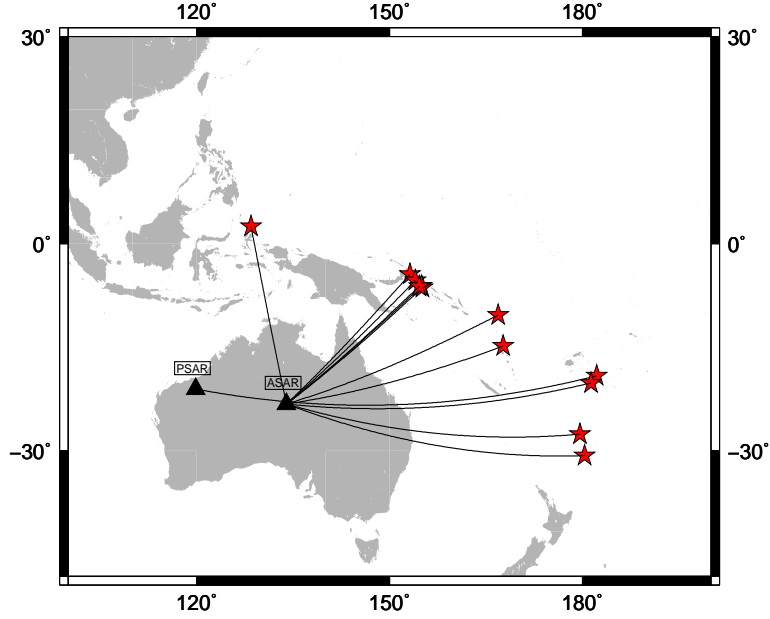


图 1.14 位于 Australia 的 IMS 台阵观测到尾波的事件，红色五角星表示地震，连接事件和台阵的黑色线表示射线路径的投影，黑色三角形表示台阵，台阵名在其旁边的方框中标出。

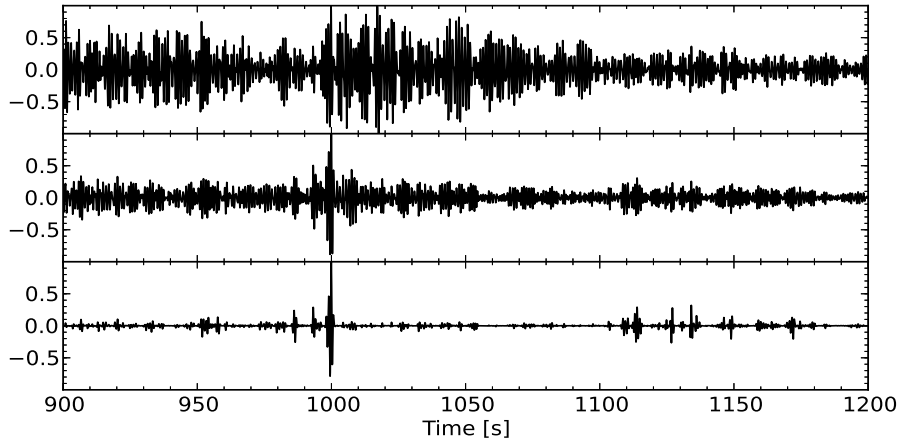


图 1.15 ASAR 台阵对表中事件的 PKiKP 波形及其叠加结果，均根据理论慢度进行叠加。上部为单道波形，下为相加权叠加 (PWS), 中为线性叠加，可以在单道上看到很大的 PKiKP 尾波能量。

台阵上观测到的 PKiKP 尾波和之前研究的有相同的特征 (1.15)，包括长的持续时间和平滑的衰减，但并不没有之前研究所提到那么高频，进行 1-2HZ 的滤波后 PKiKP 的尾波已经具有足够大的能量，但当滤波频率提高到 2-3HZ，尾波振幅则大大减小，所以 1-2HZ 是比较适合观测这个区域尾波的频率范围。观测到尾波的事件位置如图 1.14，可以发现这其中有很多地震的位置与之前研究中观测到尾波的事件处于同一区域，而这里使用的是完全不同时期的数据，这说明 PKiKP 尾波的观测是可靠的。

为了确认 PKiKP 之后的信号确实是尾波，而非单个事件在某个台阵的产生的偶然结果，这里将 ASAR 台阵接收到的 4 个地震事件的 PKiKP 附近的波形进行比较，发现均出

现相似的尾波，这 4 个地震位置相差不到 1 度，且震源深度也很接近，见表 1.1。由此可以推测，这可能是来自深部同一源产生的散射能量。同时可以发现，第四个事件产生的 PKiKP 尾波振幅较小，可能是其震级较前三个事件小 (MW 5.7)，激发的散射能量更小的缘故。

n	Date	Hour	Latitude	Longitude	Depth	Magnitude
1	2012/07/28	20:03:56.8	-4.651	153.173	41	6.5
2	2012/08/02	09:56:41.7	-4.654	153.275	46	6.1
3	2012/12/15	19:30:02.1	-4.632	153.016	52	6.1
4	2012/07/07	03:35:28.5	-4.651	153.296	35	5.7

表 1.1 四个位置相近的地震的震源参数。

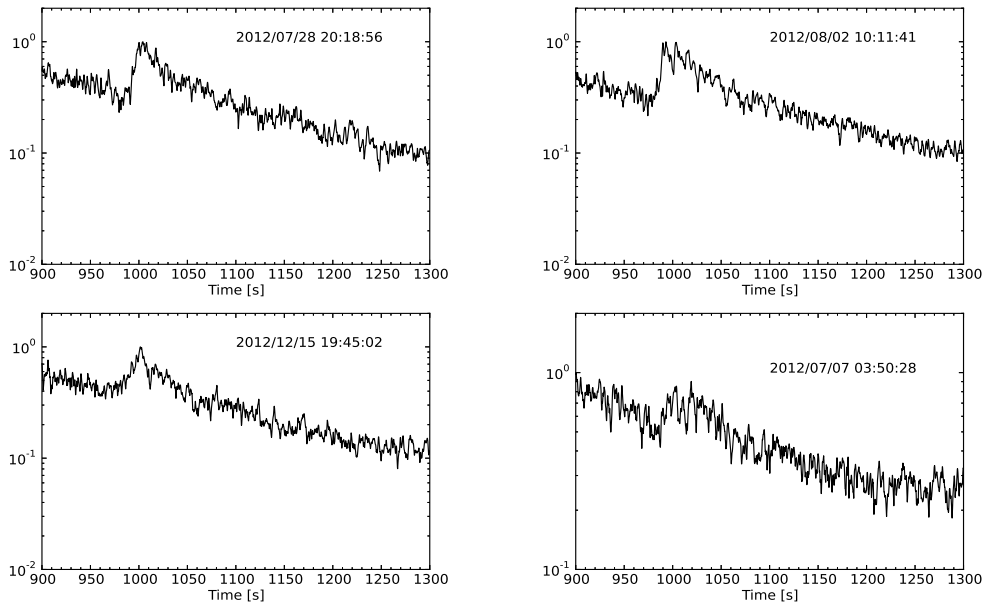


图 1.16 4 个位置接近的地震在 ARSR 台阵上产生的 PKiKP 波包叠加，频率范围为 1-2HZ，它们的尾波均持续超过 100s, 图中振幅均为对数坐标。注意到第四个事件的 PKiKP 尾波振幅较前三个小。

之前的研究认为 (Koper et al., 2004, Poupinet and Kennett, 2004), PKiKP 尾波是由之前震相的尾波，例如 P, ScP 的尾波与由深部散射产生的尾波叠加而成, 如果拟合 PKiKP 到时前的波包趋势，将其向后延伸，如果其延伸之后的曲线振幅级别小于 PKiKP 的尾波振幅，可以说明 PKiKP 之后确实有其他的能量到达台阵，其中有一部分可能是来自内核不均匀体的散射。从 ASAR 台阵数据的波包叠加明显反映出这种特征。

1.3.3 Asia

位于哈萨克斯坦的 IMS 台阵 KKAR 上也观测到了 PKiKP 理论到时后的尾波，在记录中没有看到直达的 PKiKP 震相，且从叠加的尾波波包来看，尾波大约持续 100s 左右，且其振幅先经历一段时期的上升，再逐渐减弱。如图 1.17。这种特征类似于 Vidale et al. (2000) 的观测。

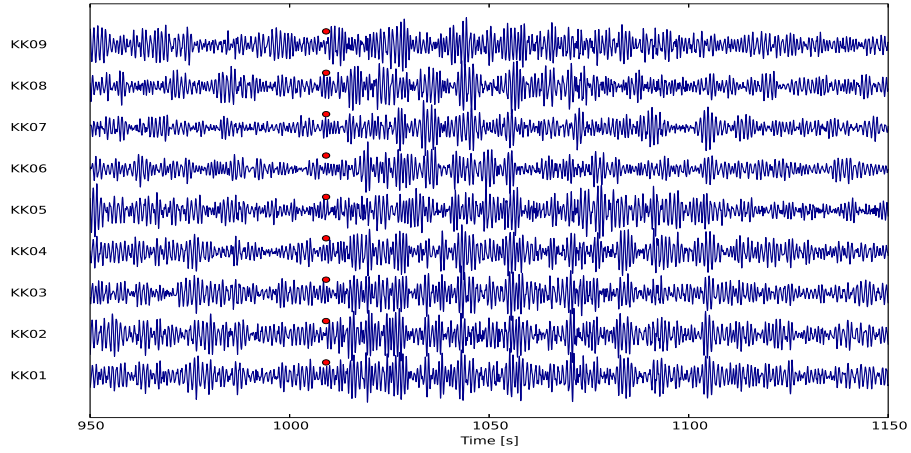


图 1.17 KKAR 台阵上观测到的尾波。红色的圆圈表示每道的 PKiKP 到时位置。

对于在 2013 年所有震中距在 10° 到 70° 的 5 级以上地震，这三个 IMS 台阵仅仅观测到这一个事件产生的明显 PKiKP 尾波。该事件位于位于北苏门答腊 ($5.42^\circ\text{N}/92.82^\circ\text{E}$, depth 15.6km, MW 5.5)，震中距 42.4° ，ICB 的反射点位于 Tanaka and Hamaguchi (1997) 所划定的东半球。从 PWS 和线性叠加的结果看来，每道 PKiKP 尾波并不存在明显的相关性，叠加后的振幅与前后的噪声级别相当。

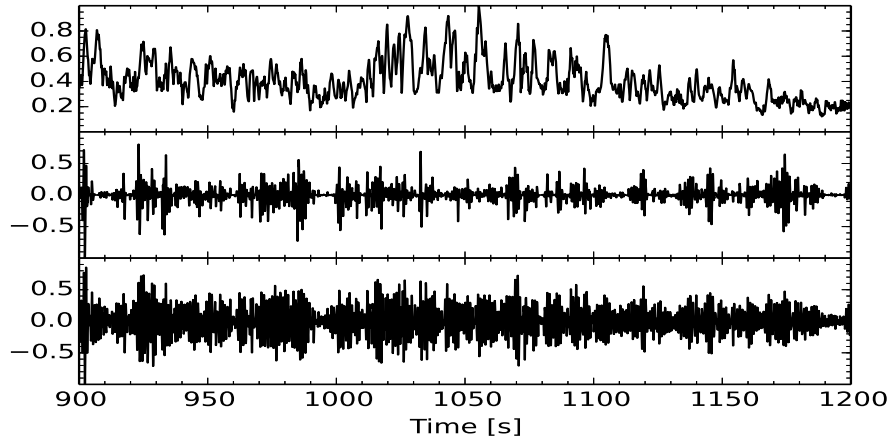


图 1.18 KKAR 台阵的 PKiKP 尾波叠加结果, 均按照理论 PKiKP 慢度进行叠加。上为波包叠加, 中间是 PWS 叠加, 下为线性叠加。可以看到叠加的 PKiKP 尾波波包振幅先增大后衰减的变化。

1.3.4 Conclusion about PKiKP coda observation

参考文献

- Bolt, B. A. and O'Neill, M. E. (1965). Times and Amplitudes of the Phases PKiKP and PKIKP. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 9(2-3):223–231.
- Creager, K. C. (1992). Anisotropy of the inner core from differential travel times of the phases PKP and PKIKP. *Nature*, 356(6367):309–314.
- Engdahl, E. R., Flinn, E. A., and Romney, C. F. (1970). Seismic waves reflected from the Earth's inner core. *Nature*, 228(5274):852–3.
- Kawakatsu, H. (2006). Sharp and seismically transparent inner core boundary region revealed by an entire network observation of near-vertical PKiKP. *EARTH PLANETS AND SPACE*, 58(7):855.
- Koper, K. D., Franks, J. M., and Dombrovskaya, M. (2004). Evidence for small-scale heterogeneity in Earth's inner core from a global study of PKiKP coda waves. *Earth and Planetary Science Letters*, 228(3–4):227–241.
- Koper, K. D., Pyle, M. L., and Franks, J. M. (2003). Constraints on aspherical core structure from PKiKP-PcP differential travel times. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978–2012)*, 108(B3).
- Lehmann, I. (1936). P', Publ. Bur. Centr. Seism. Internat. Serie A, 14:87–115.
- Poupinet, G. and Kennett, B. (2004). On the observation of high frequency PKiKP and its coda in Australia. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 146(3-4):497–511.
- Shearer, P. and Masters, G. (1990). The density and shear velocity contrast at the inner core boundary. *Geophysical Journal International*, 102(2):491–498.
- Souriau, A. and Souriau, M. (1989). Ellipticity and density at the inner core boundary from subcritical PKiKP and PcP data. *Geophysical Journal International*, 98(1):39–54.
- Tanaka, S. and Hamaguchi, H. (1997). Degree one heterogeneity and hemispherical variation of anisotropy in the inner core from PKP(BC)-PKP(DF) times. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102(B2):2925–2938.
- Tromp, J. (1993). Support for anisotropy of the Earth's inner core from free oscillations. *Nature*, 366(6456):678–681.
- Vidale, J. E., Dodge, D. A., and Earle, P. S. (2000). Slow differential rotation of the Earth's inner core indicated by temporal changes in scattering. *Nature*, 405(6785):445–448.