

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 数据及观测	1
1.1 全球前临界 PKiKP 观测	1
1.2 PKiKP 尾波	2
1.2.1 Northern America	2
1.2.2 Australia	5
1.2.3 Asia	8
1.2.4 Conclusion about PKiKP coda observation	9
参考文献	11

第一章 数据及观测

1.1 全球前临界 PKiKP 观测

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, 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 的观测都没有令人信服报道。

1.2 PKiKP 尾波

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。

1.2.1 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 1.1 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 1.2), 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 1.3, 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 在主相位后立刻出现

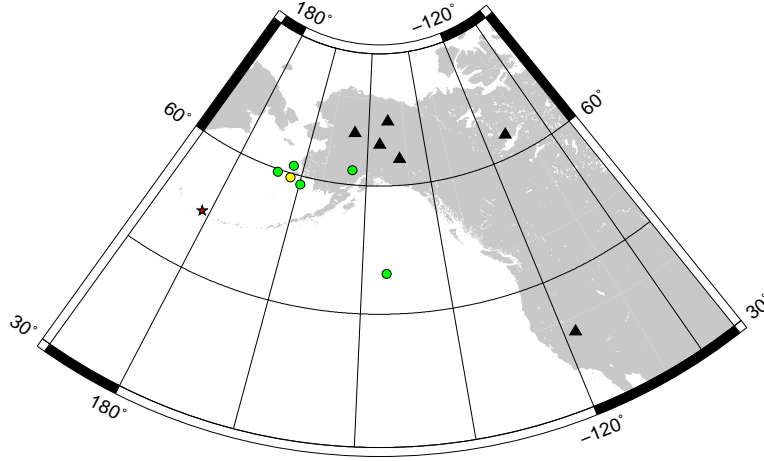


图 1.1 2014/06/23 22:29:51 发生在 ALEUTIAN 群岛的事件 (51.95N 178.58E, Depth 106, MB6.0) 和 IMS 台阵的位置。黑色三角形表示 IMS 台阵 ILAR, BCAR, IMAR, BMAR, YKA, NVAR 和 PDAR, 红色五角星表示地震位置, 圆圈表示在 ICB 反射点的投影, 其中绿色表示观测到有 PKiKP, 黄色表示未观测到 PKiKP 的台阵 ILAR 对应的反射点。

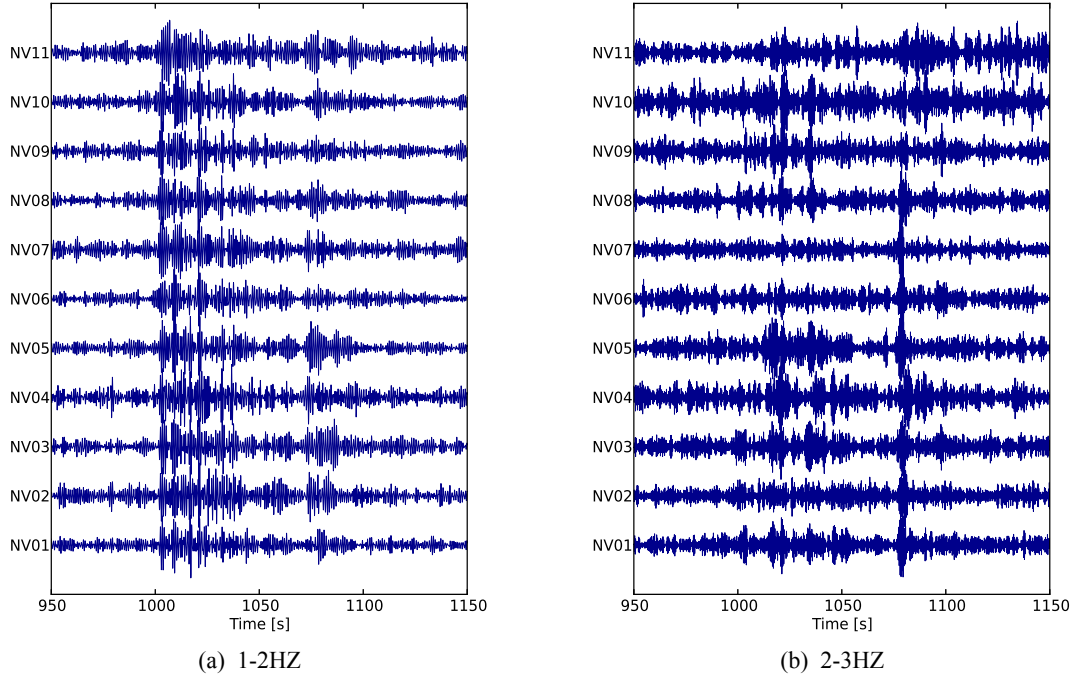


图 1.2 NVAR 台阵记录的 ALEUTIAN 群岛事件的 PKiKP 尾波 (a) 经过 1-2HZ 滤波的结果 (b) 经过 2-3HZ 滤波的结果。

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 1.4; 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 1.5, 这很大程度上排除了

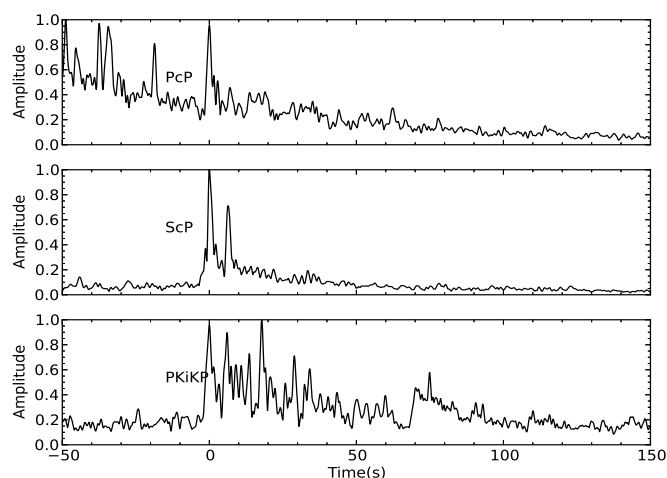


图 1.3 PcP,ScP,PKiKP 的尾波波包对比, 每道均按照理论的慢度进行叠加, 最后再按主相位最大波包振幅归一化。

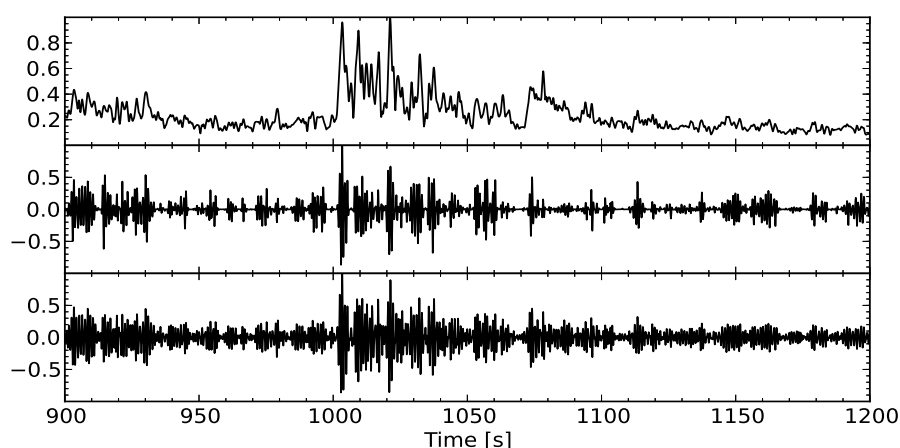


图 1.4 NVAR 台阵对 2014/06/13 事件的 PKiKP 及其尾波的叠加结果, 均根据理论慢度进行叠加。上部为波包叠加 (与图 1.3 中的相同), 中为相加权叠加 (PWS), 下为线性叠加, 均能看到清晰的 PKiKP 和其后续的尾波。

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

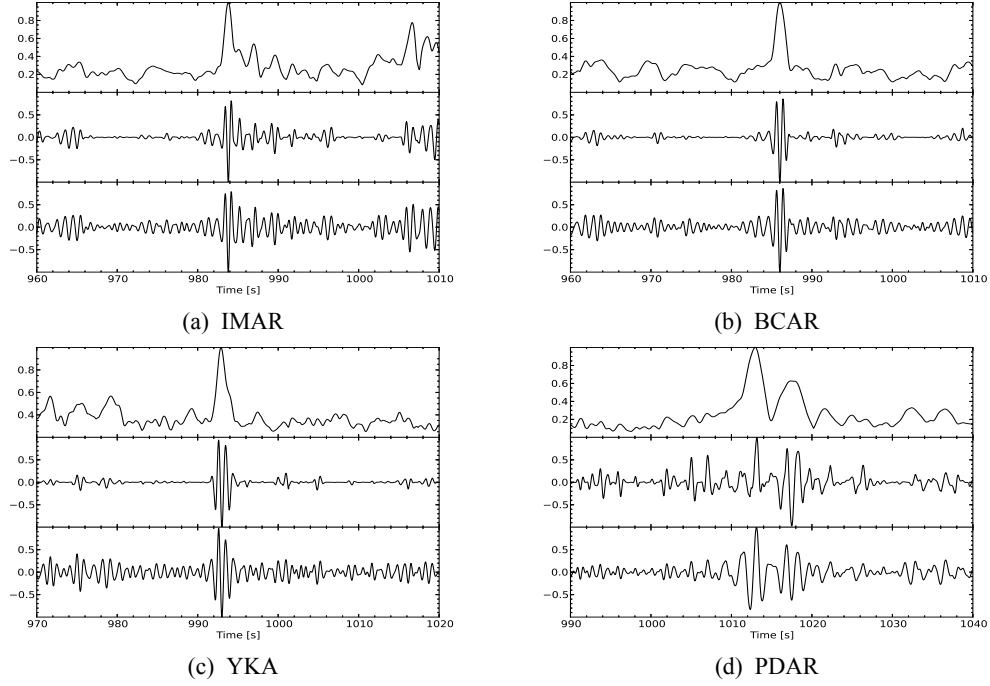


图 1.5 IMAR,BCAR,YKA,PDAR 台阵观测到的 PKiKP 相位, 上为波包叠加, 中为 PWS 叠加, 下为线性叠加。震中距分别为, 19.7° , 23.5° , 36.0° , 47.7° 。

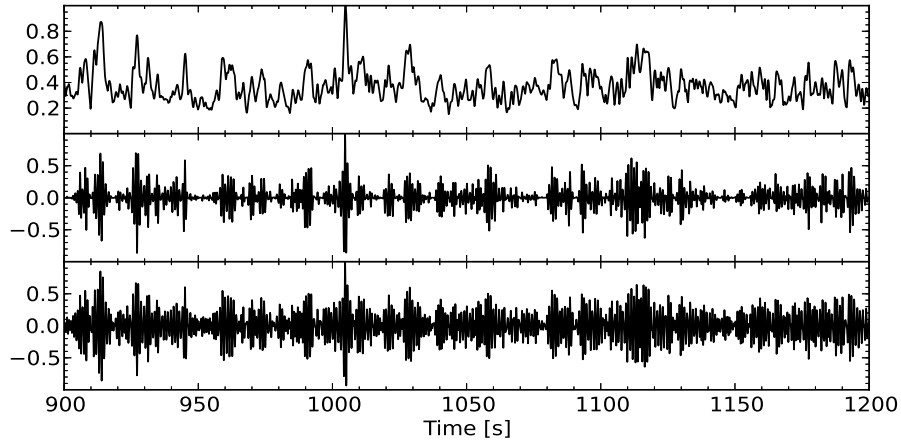


图 1.6 NVAR 台阵对 2014/06/23 前一个事件的 PKiKP 及其尾波的叠加结果, 均根据理论慢度进行叠加。上部为波包叠加, 中为相加权叠加 (PWS), 下为线性叠加, 可以看见明显的 PKiKP, 但没有明显的尾波。

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 1.6)。

1.2.2 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

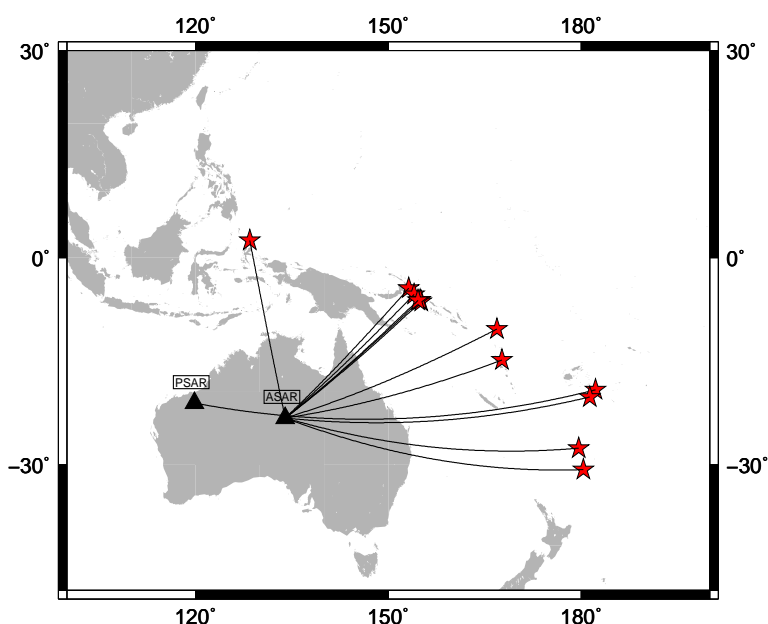


图 1.7 位于 Australia 的 IMS 台阵观测到尾波的事件，红色五角星表示地震，连接事件和台阵的黑色线表示射线路径的投影，黑色三角形表示台阵，台阵名在其旁边的方框中标出。

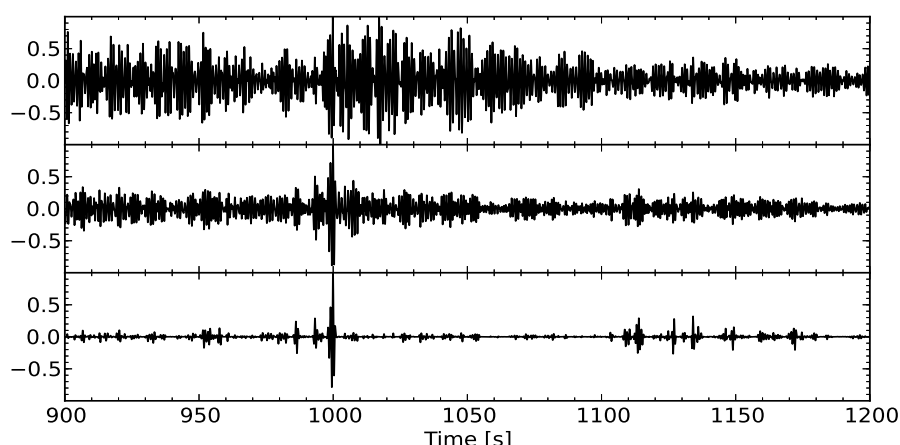


图 1.8 ASAR 台阵对表中事件的 PKiKP 波形及其叠加结果，均根据理论慢度进行叠加。上部为单道波形，下为相加权叠加 (PWS), 中为线性叠加，可以在单道上看到很大的 PKiKP 尾波能量。

台阵上观测到的 PKiKP 尾波和之前研究的有相同的特征 (1.8)，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 1.7，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。

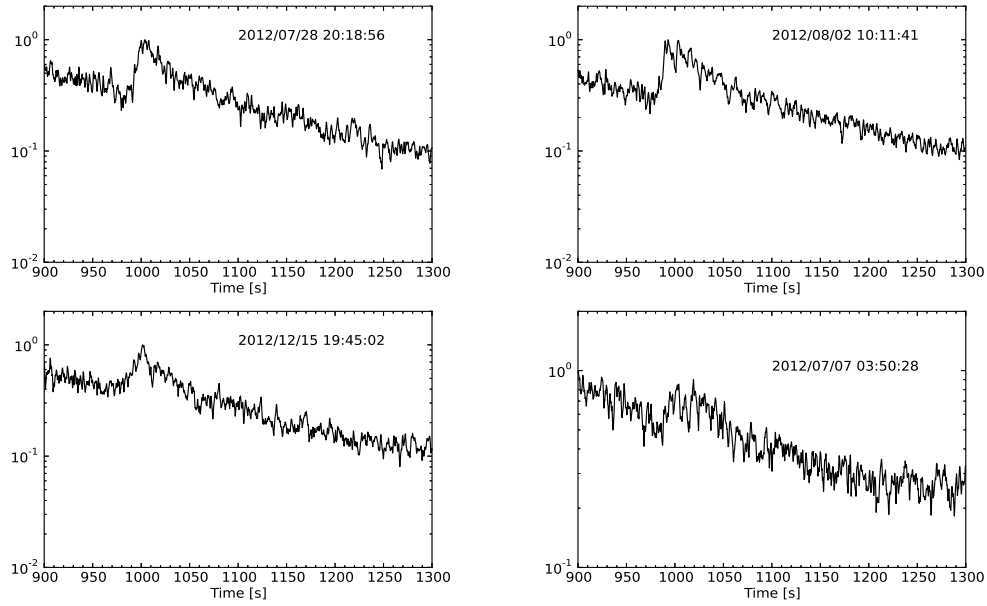


图 1.9 4 个位置接近的地震在 ARSR 台阵上产生的 PKiKP 波包叠加，频率范围为 1-2HZ，它们的尾波均持续超过 100s, 图中振幅均为对数坐标。注意到第四个事件的 PKiKP 尾波振幅较前三个小。

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。

1.2.3 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 1.10。这种特征类似于 Vidale et al. (2000) 的观测。

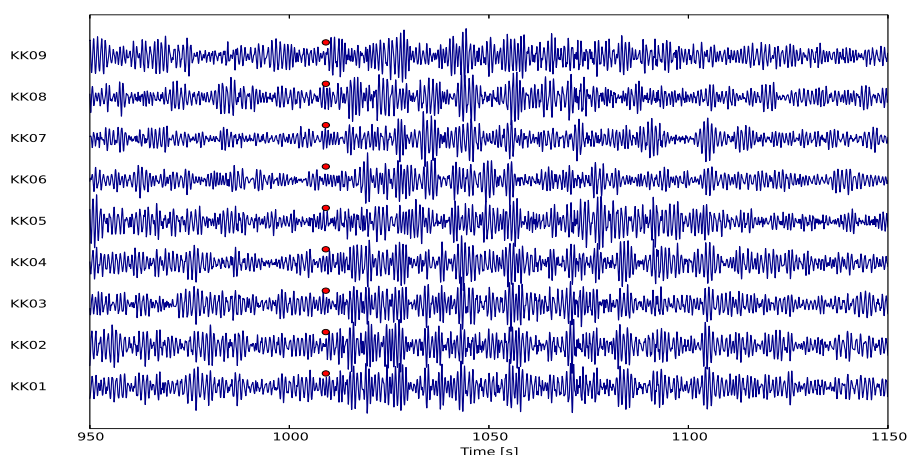


图 1.10 KKAR 台阵上观测到的尾波。红色的圆圈表示每道的 PKiKP 到时位置。

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。

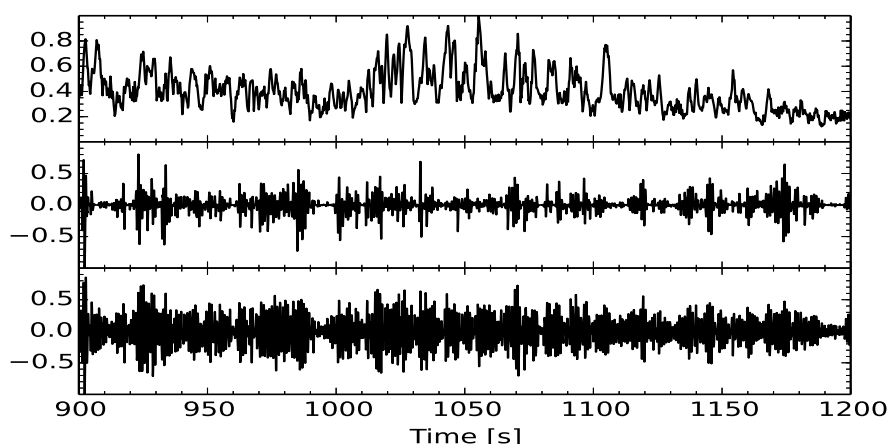


图 1.11 KKAR 台阵的 PKiKP 尾波叠加结果, 均按照理论 PKiKP 慢度进行叠加。上为波包叠加，中间是 PWS 叠加，下为线性叠加。可以看到叠加的 PKiKP 尾波波包振幅先增大后衰减的变化。

1.2.4 Conclusion about PKiKP coda observation

参考文献

- Creager, K. C. (1992). Anisotropy of the inner core from differential travel times of the phases PKP and PKIKP. *Nature*, 356(6367):309–314.
- 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.
- 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.
- 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.