

GNSS 组合系统用户完好性监测保护门限算法研究

杨林, 吴德伟, 卢虎, 毛虎
(空军工程大学信息与导航学院, 西安 710077)

摘要: 航空用户对卫星导航系统完好性指标的要求极高,依据 GNSS 组合系统提升完好性水平的思想,提出一种使用保护门限作为多星座组合系统航空用户完好性监测指标的算法。该算法将不同星座、不同完好性监测方式紧密结合,使航空用户的完好性水平大幅提高。仿真结果表明, GPS/Galileo/北斗组合系统能够为全球范围内的低空飞行、极区导航提供安全保障,证明了该算法的有效性与可行性。

关键词: 低空飞行; 全球导航卫星系统; 组合系统; 完好性; 保护门限

中图分类号: V448; TN967.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2014)10-0061-04

On Protection Threshold Algorithm for User Integrity Monitoring of GNSS Combined System

YANG Lin, WU De-wei, LU Hu, MAO Hu

(Institute of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: The aviation users have high requests to integrity of GNSS. Based on the idea of improving the integrity level of GNSS combined system, an algorithm is put forward using protection threshold as an indicator for monitoring the integrity of GNSS combined system for aviation users. The algorithm integrates tightly the different satellite systems with different integrity monitoring methods, which can increase the aviation users' integrity level significantly. The simulation results show that the combined system of GPS/Galileo/Compass can provide global low-altitude flight and polar navigation with security assurance, and the effectiveness and feasibility of the method is proved.

Key words: low-altitude flight; GNSS; combined system; integrity; protection level

0 引言

低空飞行(距离地面小于 1000 m 的飞行)和极区导航因具有重要的军事战略及战术价值而备受各国重视。由于陆基无线电导航设备覆盖区域有限、提供信息单一,无法满足低空飞行、极区导航的保障需求,因此考虑采用全球导航卫星系统(GNSS)提升航空用户的完好性水平。文献[1]依据星基增强系统(SBAS)广播的完好性信息,提出基于 Galileo 系统威胁误引导概率(PHMI)的 GNSS 用户完好性监测方式;文献[2]分析了北斗系统在我国本土区域的水平/垂直保护门限(HPL/VPL)性能;文献[3]提出采用广播全新完好性信息解决多系统兼容互用,提升完好性水平的策略。

通过以上分析,在合理利用各卫星导航系统现有完好性信息的前提下,研究以保护门限作为多星座组合系统完好性监测指标的协同算法,通过对各监测假设下用户完好性的仿真分析,获得了良好的效果。

1 卫星导航系统完好性监测方式

1.1 SBAS + GPS 系统完好性监测方式

对于 SBAS + GPS 系统,用户利用与卫星间的几何构型和伪距残差计算得到定位位置^[4]。但由于无法得到用户真实位置,所以采用估计获得保护门限(Protection Level, PL)近似用户真实定位误差。用户完好性计算时,输出为一定完好性风险概率下的 HPL/VPL^[5]。

结合伪距域上的方差输入,利用最小二乘估计得到用户在东北天坐标系中的定位域方差估计值为

$$(G^T W G)^{-1} = \begin{bmatrix} \sigma_E^2 & \sigma_{EN} & \sigma_{EU} & \sigma_{ET} \\ \sigma_{EN} & \sigma_N^2 & \sigma_{NU} & \sigma_{NT} \\ \sigma_{EU} & \sigma_{NU} & \sigma_U^2 & \sigma_{UT} \\ \sigma_{ET} & \sigma_{NT} & \sigma_{UT} & \sigma_T^2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

收稿日期:2013-12-25 修回日期:2014-02-27

基金项目:国家自然科学基金(61273049)

作者简介:杨林(1989—),男,陕西西安人,硕士生,研究方向为卫星导航及完好性监测技术。

式中: \mathbf{G} 为观测几何矩阵; \mathbf{W} 为权矩阵。在误差互不相关的条件下

$$\mathbf{W} = \text{diag}^{-1}[\sigma_1^2 \quad \sigma_2^2 \quad \cdots \quad \sigma_i^2] \quad (2)$$

式中, σ_i^2 为第 i 颗可见卫星伪距观测方差, 可表示为

$$\sigma_i^2 = \sigma_{i,\text{flt}}^2 + \sigma_{i,\text{UIRE}}^2 + \sigma_{i,\text{air}}^2 + \sigma_{i,\text{tropo}}^2 \quad (3)$$

式中, $\sigma_{i,\text{flt}}^2$ 、 $\sigma_{i,\text{UIRE}}^2$ 、 $\sigma_{i,\text{air}}^2$ 、 $\sigma_{i,\text{tropo}}^2$ 分别为第 i 颗卫星的星钟星历误差、电离层延迟误差、接收机和多径效应误差以及对流层延迟误差。

由式(1)得到水平位置误差椭圆长半轴为

$$d_{\text{major}} = \sqrt{\frac{\sigma_E^2 + \sigma_N^2}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_E^2 - \sigma_N^2}{2}\right)^2 + \sigma_{\text{EN}}^2}} \quad (4)$$

则 HPL 和 VPL 的算式为

$$a_{\text{HPL}} = K_{\text{H}} \cdot d_{\text{major}} \quad (5)$$

$$a_{\text{VPL}} = K_{\text{V}} \cdot \sigma_{\text{U}} \quad (6)$$

式中, 参数 K_{H} 、 K_{V} 大小由完好性风险概率确定。用户定位误差告警限值(Alert Level, AL)与保护门限比较, 若 PL 小于 AL, 系统完好性得到保证; 反之, 若 PL 大于等于 AL, 触发系统完好性告警机制。

1.2 北斗、Galileo 系统完好性监测方式

北斗系统 B2 频率与 Galileo E5b 频率完全重合^[6], 未来将在 B2 频率上实现与 Galileo 生命安全(SOLS)应用相适应的高级别完好性服务。因此, 假设北斗系统采用与 Galileo 系统相似的完好性监测方式是合理的。

Galileo 系统广播的完好性信息包含空间信号误差(SISE)、空间信号精度(SISA)以及空间信号测量精度(SISMA)。用户完好性监测时, 需判断 H_0 (无故障)、 H_1 (单颗卫星故障) 条件下的完好性状态, 判断依据是在一定水平/垂直告警限值(HAL/VAL)下用户定位误差的 P_{HMI} 值^[7], 可表示为

$$P_{\text{HMI}} = P_{\text{HMI}}(a_{\text{HAL}}) + P_{\text{HMI}}(a_{\text{VAL}}) \quad (7)$$

式中: $P_{\text{HMI}}(a_{\text{HAL}}) = P(\text{水平定位误差大于 } a_{\text{HAL}})$; $P_{\text{HMI}}(a_{\text{VAL}}) = P(\text{垂直定位误差大于 } a_{\text{VAL}})$ 。当 P_{HMI} 小于完好性风险时, 系统完好性得到保证; 当 P_{HMI} 大于等于完好性风险时, 用户完好性监测系统必须发出告警信息。

2 GPS/Galileo/北斗组合系统完好性研究

2.1 GNSS 组合系统完好性监测方式

保护门限的一般表达式为^[8]

$$a_{\text{PL}} = K\delta + f \quad (8)$$

式中: 参数 K 的值与假设条件下完好性风险限值分配相关; δ 为假设条件下定位误差均方差; f 为假设条件下伪距测量偏差产生的定位误差。

Galileo(北斗)系统可用 SISA 描述空间段卫星广播时钟和星历误差, $\sigma_{u,L,i}$ 描述环境段造成的误差。在多系统无故障模式 H_0 下, 多系统的卫星伪距观测方差

存在如下等式

$$\underbrace{\varepsilon_{\text{SISA}_i}^2 + \sigma_{u,L,i}^2}_{\text{Galileo, Compass}} = \underbrace{\sigma_{i,\text{flt}}^2 + \sigma_{i,\text{UIRE}}^2 + \sigma_{i,\text{air}}^2 + \sigma_{i,\text{tropo}}^2}_{\text{SBAS+GPS}} \quad (9)$$

采用 R 、 Q 、 M 分别表示观测用户当前 SBAS + GPS、Galileo 及北斗系统可见卫星集合, 则 $R \cup Q \cup M$ 表示组合系统观测卫星集合。在 H_0 条件下, 用户水平/垂直保护门限为

$$a_{\text{HPL}_{H_0}} = K_{\text{H}} \cdot d_{\text{major}, H_0} \quad (10)$$

$$a_{\text{VPL}_{H_0}} = K_{\text{V}} \cdot \sigma_{\text{U}, H_0} \quad (11)$$

通过式(1)求解时, 假设各伪距观测方差相互独立, 权矩阵 \mathbf{W} 为

$$\mathbf{W} = \text{diag}^{-1}[\sigma_{1,1}^2 \quad \cdots \quad \sigma_{1,n}^2 \quad \sigma_{2,1}^2 \quad \cdots \quad \sigma_{2,m}^2 \quad \sigma_{3,1}^2 \quad \cdots \quad \sigma_{3,l}^2] \quad (12)$$

式中: $\begin{cases} \sigma_{1,i}^2 (i=1, 2, \dots, n; i \in R) \\ \sigma_{2,j}^2 (j=1, 2, \dots, m; j \in Q), \text{ 分别从 SBAS、Galileo、} \\ \sigma_{3,k}^2 (k=1, 2, \dots, l; k \in M) \end{cases}$

北斗系统广播的完好性信息中获得。参照式(9)可知

$$\sigma_{1,i}^2 = \sigma_{i,\text{flt}}^2 + \sigma_{i,\text{UIRE}}^2 + \sigma_{i,\text{air}}^2 + \sigma_{i,\text{tropo}}^2, \quad (13)$$

$$i = 1, 2, \dots, n; i \in R$$

在无故障模式 H_0 下, 对于 Galileo 和北斗系统, 第 j 颗、第 k 颗卫星伪距观测方差分别为

$$\begin{cases} \sigma_{2,j}^2 = \varepsilon_{\text{SISA}_j}^2 + \sigma_{u,L,j}^2, & j = 1, 2, \dots, m; j \in Q \\ \sigma_{3,k}^2 = \varepsilon_{\text{SISA}_k}^2 + \sigma_{u,L,k}^2, & k = 1, 2, \dots, l; k \in M \end{cases} \quad (14)$$

此外, 对于 Galileo 和北斗系统, 在联合观测中, 还需考虑在单卫星故障模式 H_1 下, 卫星信号伪距测量偏差的影响, 其值 $\varepsilon_{\text{TH}_x}$ 大小为^[7]

$$\varepsilon_{\text{TH}_x} = k_{\text{Pfa}} \cdot \sqrt{\varepsilon_{\text{SISA}_x}^2 + \varepsilon_{\text{SISMA}_x}^2} \quad (15)$$

式中, k_{Pfa} 为传递系数, 由对应虚警概率决定。对于 $\varepsilon_{\text{TH}_x}$ 造成的定位偏差影响, 存在 3 种情况: 1) 在仅 Galileo 系统第 j 颗卫星受到故障影响的 H_{Gal} 条件下; 2) 在仅北斗系统第 k 颗卫星受到故障影响的 H_{Com} 条件下; 3) 在 Galileo 和北斗系统第 j 颗及第 k 颗卫星均受到故障影响的 $H_{\text{Gal,Com}}$ 条件下。以 $H_{\text{Gal,Com}}$ 条件为例, 造成的定位偏差向量为

$$\mathbf{F} = \mathbf{S}[0 \quad \cdots \quad 0 \quad \varepsilon_{\text{TH}_j} \quad 0 \quad \cdots \quad 0 \quad \varepsilon_{\text{TH}_k} \quad 0 \quad \cdots \quad 0]^T = [a_1 \quad a_2 \quad a_3 \quad a_4]^T \quad (16)$$

式中, \mathbf{S} 为投影矩阵。水平和垂直方向偏差可单独表示为

$$\begin{cases} f_{\text{H},jk} = \sqrt{a_1^2 + a_2^2} \\ f_{\text{V},jk} = |a_3| \end{cases} \quad (17)$$

同理可计算 H_{Gal} 、 H_{Com} 条件下定位偏差 $f_{\text{H},j}$ 、 $f_{\text{V},j}$ 、 $f_{\text{H},k}$ 、 $f_{\text{V},k}$ 的结果。

去掉第 j 及第 k 颗卫星伪距观测方差后, 得到权矩阵 \mathbf{W}' 。根据权矩阵 \mathbf{W}' 与相应观测几何矩阵 \mathbf{G}' 可计算出水平误差椭圆长半轴 $d_{\text{Gal,Com}}$, 垂直定位均方差 $\sigma_{\text{Gal,Com}}$ 。

根据式(8),可得该假设下的水平/垂直保护门限为

$$a_{HPL_{Gal,Com}} = K_{Gal,Com,H} \cdot d_{Gal,Com} + \max(f_{H,jk}) \quad (18)$$

$$a_{VPL_{Gal,Com}} = K_{Gal,Com,V} \cdot \sigma_{Gal,Com} + \max(f_{V,jk}) \quad (19)$$

同理可计算 H_{Gal} 、 H_{Com} 条件下水平误差椭圆半径 d_{Gal} 、 d_{Com} ; 垂直定位均方差 σ_{Gal} 、 σ_{Com} , 根据式(18)、式(19) 计算可得 $a_{HPL_{Gal}}$ 、 $a_{VPL_{Gal}}$ 、 $a_{HPL_{Com}}$ 、 $a_{VPL_{Com}}$ 。

GNSS 组合系统用户完好性监测的水平/垂直保护门限为

$$a_{HPL} = \max(a_{HPL_{H_0}}, a_{HPL_{Gal}}, a_{HPL_{Com}}, a_{HPL_{Gal,Com}}) \quad (20)$$

$$a_{VPL} = \max(a_{VPL_{H_0}}, a_{VPL_{Gal}}, a_{VPL_{Com}}, a_{VPL_{Gal,Com}}) \quad (21)$$

2.2 GNSS 组合系统完好性风险限值分配

GNSS 系统垂直方向定位能力较水平方向相对较弱,因此针对航空用户的完好性分析主要集中在垂直方向上^[9]。如图 1 所示, VPL 大于等于 VAL 时,系统触发告警。

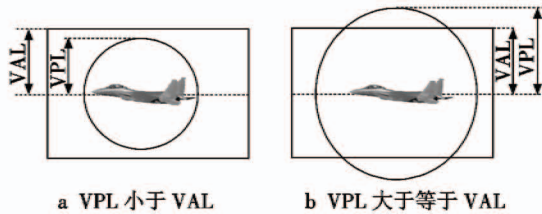


图 1 垂直方向上保护门限与告警门限之间的关系

Fig. 1 Relationship between VPL and VAL

低空飞行对速度、垂直方向安全性能的要求与精密进近着陆相近,因此保守地认为,低空飞行与 I 类精密进近阶段对导航系统性能要求相同,即水平告警门限 40 m、垂直告警门限 10 m、用户完好性风险值 2.0×10^{-7} 。以保护门限作为监测标准的组合系统需要采用统一、确定的完好性限值分配方式。

定义 $P_{md,i}$ 表示监测假定 H_i 下保护门限漏警概率,则用户完好性风险值为

$$IR = \sum_{i=0}^N P_{md,i} \cdot P(H_i) \quad (22)$$

由于伪距误差、定位误差均服从高斯分布,参数 K_i 为

$$K_i = Q(P_{md,i}/2) \quad (23)$$

式中, $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2/2} dt$ 。

SBAS + GPS 系统除地面监测设备保障外,要求用户完好性监测风险限值在 H_0 条件下为 1.0×10^{-7} ,而 Galileo(北斗)系统除地面监测设备外,要求用户完好性监测风险限值在 H_0 、 H_1 条件下均小于 1.7×10^{-7} 。因此,为了满足低空飞行阶段的需求,选择用户总完好性风险值为 1.7×10^{-7} ,则完好性风险限值分配方案为: H_0 条件为 1.0×10^{-7} ; H_{Gal} 、 H_{Com} 条件均为 3.499×10^{-8} ;

$H_{Gal,Com}$ 条件为 2.0×10^{-11} ; 水平/垂直方向分配比例为 2:98^[10]; H_0 先验概率约为 1; H_{Gal} 、 H_{Com} 先验概率均为 10^{-5} ^[7]。根据式(22)、(23) 计算可得,低空飞行阶段保护门限漏警概率 $P_{md,i}$ 与参数 K 的取值如表 1 所示。

表 1 漏警概率与 K 参数值

Table 1 Value of false dismissal probability and factor K

H_i	方向	$P_{md,i}$	K
H_0	垂直	9.82×10^{-8}	5.33
$H_{Gal}(H_{Com})$	垂直	3.43×10^{-3}	2.93
$H_{Gal,Com}$	垂直	1.96×10^{-1}	1.29

3 仿真分析

针对航空用户完好性监测的 VPL 进行仿真,假定在 Galileo、北斗系统卫星已布满星座的条件下,分别建立 SBAS + GPS (Walker 24/6/1 构型)、Galileo (Walker 27/3/1 构型)、北斗(5GEO + 27MEO + 3IGSO) 系统星座。GPS 系统卫星位置参照 2013 年 11 月 27 日星历推算得到, Galileo 及北斗系统参照 SOLS 标准选取 $\epsilon_{SISA} = 0.8$ m, $\epsilon_{SISMA} = 1.2$ m。以经纬度 5° 为间隔,将全球划分为 72×36 的方格,仿真总时间为 24 h,每 5 min 于各方格中心计算用户完好性监测的 VPL 值,取最大值得到仿真结果。

3.1 SBAS + GPS、Galileo、北斗单系统完好性监测仿真

SBAS + GPS、Galileo、北斗单系统航空用户完好性监测 VPL 值分布如图 2 所示。

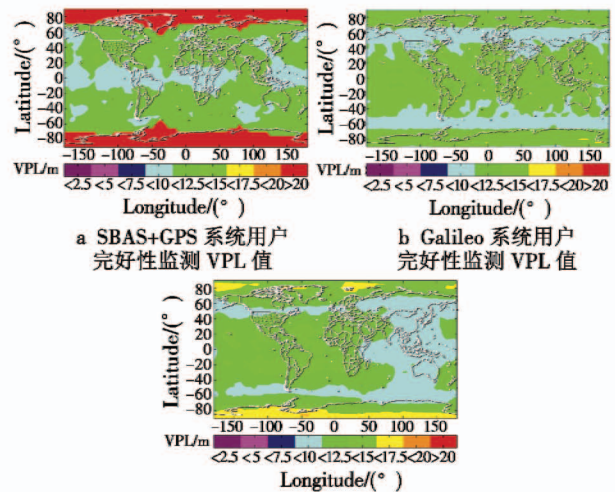


图 2 SBAS + GPS、Galileo、北斗单系统用户完好性监测 VPL 值

Fig. 2 VPLs of SBAS + GPS, Galileo and Compass single-system for user integrity monitoring

由图 2a 可见, SBAS + GPS 系统高纬区域因无法接收到 GEO 完好性信息,因此航空完好性无法保障,在中低纬区域,仅 24.3% 的用户的 VPL 值在 10 m 左右,不能满足低空飞行要求。由图 2b 可见, Galileo 系统全球大

部分区域的 VPL 值集中在 15 m 左右,中纬少部分区域的 VPL 值维持在 12.5 m 范围内,但这仍不能满足要求。由图 2c 可见,由于 GEO、IGSO 卫星的辅助,在我国领土及亚太区域能够使 VPL 值降低到 10 m 以内,但两极区域 VPL 值均超过了 15 m,纵观全球仍存在低空飞行保障的“盲区”。显然,任何一种卫星导航系统都不能独当一面地完成好航空用户完好性保障任务,因此需要通过系统间组合进一步提升完好性保障水平及可靠性。

3.2 SBAS + GPS/Galileo 双系统组合完好性监测仿真

SBAS + GPS/Galileo 双系统组合航空用户完好性监测 VPL 值分布如图 3 所示。

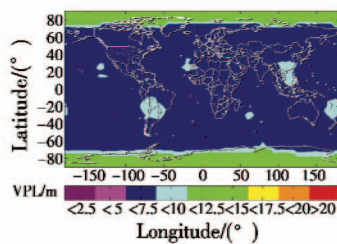


图 3 SBAS + GPS/Galileo 组合系统用户完好性监测 VPL 值

Fig. 3 VPL of SBAS + GPS/Galileo combined system for user integrity monitoring

由图 3 可见,SBAS + GPS/Galileo 组合系统在中低纬度区域可使用户 VPL 值改善到 7.5 ~ 10 m 范围内,基本满足低空飞行完好性要求。但在南北极区域,用户 VPL 值较大,在 15 m 左右,无法满足低空、极区导航的需求。因此,对于完好性指标要求苛刻的航空导航来说,双系统组合仍有引进新星座的必要性。

3.3 SBAS + GPS/Galileo/北斗多系统组合完好性监测仿真

SBAS + GPS/Galileo/北斗多系统组合航空用户完好性监测 VPL 值分布如图 4 所示。

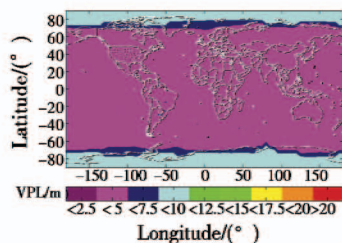


图 4 SBAS+GPS/Galileo/北斗组合系统用户完好性监测 VPL 值

Fig. 4 VPL of SBAS + GPS/Galileo/Compass combined system for user integrity monitoring

由图 4 可见,GPS、Galileo 及北斗组合系统可有效降低 VPL 值,进一步提升航空完好性、可用性指标。在中低纬度区域,航空用户 VPL 值降低到 5 m 左右;在高纬度、极区区域,能够使 VPL 值改善到 10 m 以内,因此,该组合系统能为全球范围内的低空飞行、极区导航

提供安全、可靠的航空保障。

4 结论

采用保护门限作为 GNSS 组合系统航空用户完好性监测指标的算法,在全球范围内使 VPL 小于 10 m,能够为低空飞行、极区导航安全保驾护航。此外,兼容美国及欧盟的 GPS、Galileo 等卫星导航系统,能够增强中国北斗的服务能力,有多个星座为中国提供兼容后备,必然使得北斗导航系统的可靠性大为提升。

参考文献

- [1] KNEISSLAND F, STOBER C. Combined integrity of GPS and Galileo[J]. Inside GNSS, 2010, 5(1):52-63.
- [2] 杨鑫春,李征航,吴云.北斗卫星导航系统的星座及 XPL 性能分析[J].测绘学报,2011,40(s):68-72.
YANG X C, LI Z H, WU Y. The performance analysis of constellation and XPL for Compass[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2011, 40(s):68-72.
- [3] OSTOLAZA J, ALCANTARILLA I, CARO J. An efficient approach for the development and deployment of a multi-constellation augmentation system; MagicSBAS[C]//ION International Technical Meeting, 2011:11-18.
- [4] 鲁郁. GPS 全球定位接收机——原理与软件实现[M].北京:电子工业出版社,2009:121-126.
LU Y. GPS receiver, theory and software realization[M]. Beijing: Publishing House of Electronic Industry, 2009: 121-126.
- [5] 李康,巩冠峰, SABATINI R. GPS 地基增强系统简介及其性能仿真验证[J].电光与控制,2013,20(8):89-94.
LI K, GONG G F, SABATINI R. Introduction of GPS ground based augmentation system and performance simulation[J]. Electronics Optics & Control, 2013, 20(8):89-94.
- [6] 谭述森.北斗卫星导航系统的发展与思考[J].宇航学报,2008,29(2):391-396.
TAN S S. Development and thought of Compass navigation satellite system [J]. Journal of Astronautics, 2008, 29(2):391-396.
- [7] OEHLER V, BOYERO J, LUONGO F. The Galileo integrity concept[C]//ION GNSS Meeting, 2004:604-615.
- [8] RIFE J, PULLEN S, ENGE P, et al. Paired overbounding for non-ideal LAAS and WAAS error distributions[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2006, 42(4):1386-1395.
- [9] 郭睿,郑勇,杜兰. GPS 和 Galileo 系统下 RAIM 算法可用性分析[J].测绘科学技术学报,2006,23(6):448-450.
GUO R, ZHENG Y, DU L. Analysis on RAIM availability of different navigation systems[J]. Journal of Zhengzhou Institute of Surveying and Mapping, 2006, 23(6):448-450.
- [10] OEHLER V, LUONGO F, TRAUTENBERG H L, et al. The Galileo integrity concept and performance[C]//ION GNSS Meeting, 2006:312-322.