

ka 频段片式一体化发射组件的设计与实现

石海然, 张 榕, 倪子楠, 薛 欣, 刘亚峰

(北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094)

摘要: 介绍了一种 ka 频段片式一体化发射组件的研制方法和关键技术; 为满足一体化片式组件小型化且工作频率高的要求, 提出了一种集成天线辐射单元与射频模块三维垂直互联的方法, 同时结合多功能芯片 (MFC) 技术、多芯片组装 (MCM) 技术实现组件高密度集成; 研制的一体化组件尺寸为 $48\text{ mm} \times 48\text{ mm} \times 6.3\text{ mm}$ 、质量不超过 100 g 、集成 16 个发射通道, 每个通道包含 6 位数控移相器和 5 位数控衰减器; 该组件集成度高、较传统组件在尺寸和重量上具有较大的优势。

关键词: 一体化发射组件; 垂直互联; 片式; 高密度装配

Design of a ka Band Integrated Tile-type Transmit Module

Shi Hairan, Zhang Lu, Ni Zinan, Xue Xin, Liu Yafeng

(Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China)

Abstract: Design method and key technologies of a ka-band integrated tile-type transmit module are given. In order to meet the requirements of small size, high operation frequency, a new method of vertical interconnection technology is proposed, and the multi-functional chip (MFC) technique and multi-chip module (MCM) technique are also adopted to increase the integration level. Finally, a tile-type transmit module with 16 transmit channels has been developed successfully. The tile-type module features high integration level, has more advantages on the size and weight than the conventional module.

Keywords: integrated transmit module; vertical interconnection; tile-type; high density assembly

0 引言

T/R 组件是有源相控阵天线的关键部件, 与传统砖式 T/R 相比, 片式 T/R 组件具有低廓线结构特点, 易于进行天线的共形设计。片式 T/R 组件在减轻重量, 减少体积方面具有明显的优势^[1]。

在 ka 频段实现宽角扫描, 辐射单元的间距非常小, 片式组件在两个方向上均受格距限制。垂直互联技术可实现射频信号和低频信号在多个亚层间传输, 是实现片式组件的关键^[2]。相控阵组件内通常需要集成移相、衰减、功率放大、电源调制等功能, 只有采用高密度装配工艺才能在有限的空间内实现大量不同功能芯片集成。

一体化发射组件将天线阵列和发射模块综合考虑, 最大限度的减少辐射单元与发射模块输出间的损耗, 改善不同辐射单元幅度相位的一致性。采用垂直互联技术实现辐射单元与发射模块垂直互联, 射频信号的垂直馈入, 低频信号的层间互联。通过多功能芯片技术、多芯片组件技术将功率放大、功分、移相、衰减、串并转换等芯片集成在一个组件内, 使传统的砖式组件的体积大大缩小, 从而实现组件高性能、小型化、轻量化^[3]。

1 一体化发射组件结构及原理

ka 频段片式一体化发射组件对辐射阵要求包括: $\pm 35^\circ$ 扫描、 $26 \pm 0.5\text{ GHz}$ 工作频率、圆极化、低副瓣, 综合考虑以上指标本设计采用微带贴片天线。对于微带贴片天线带宽窄的缺点, 采用介质支撑的特殊结构, 使得天线的工作带宽有效展

宽。通过阵面综合及考虑辐射单元间的互耦效应, 确定辐射单元间距为 10 mm 。

将具有同样的功能和接口的通道集成在同一封装中, 共用电源和控制信号, 可以提高单元面积的使用效率。图 1 为一体化发射组件原理框图, 该组件将 16 个通道集成, 每个通道包括了功分器、驱动级放大器、数控移相衰减器、末级功率放大器以及串并转换电路。

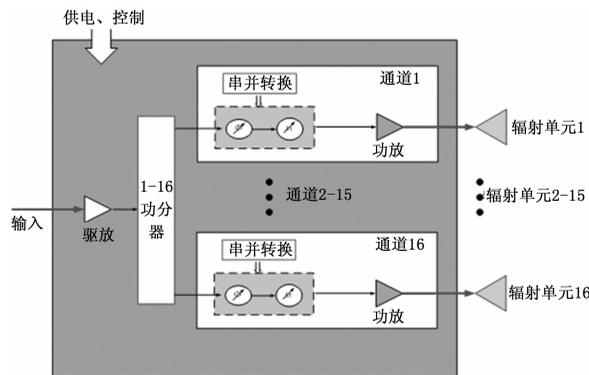


图 1 一体化发射组件原理框图

图 2 为组件结构示意图, 从上到下依次为辐射层、金属冷板散热层、射频层、控制与供电层以及机构套框和结构底板。辐射层采用微带贴片实现射频信号的空间辐射; 金属散热冷板, 既作为射频层、辐射层的支撑结构, 又作为模块内功率器件散热的通道; 射频层实现射频信号的驱动放大、功分、移相衰减、串并转换及末级功率放大; 控制与供电层安装电源调制芯片、电容等元器件; 结构套框和结构底板为铝制金属盖板, 保护内部元器件及屏蔽模块与外界之间的电磁泄露。

收稿日期: 2018-01-26; 修回日期: 2018-02-22。

作者简介: 石海然 (1982-), 男, 河北承德市人, 硕士, 工程师, 主要从事相控阵天线有源射频电路的研究。

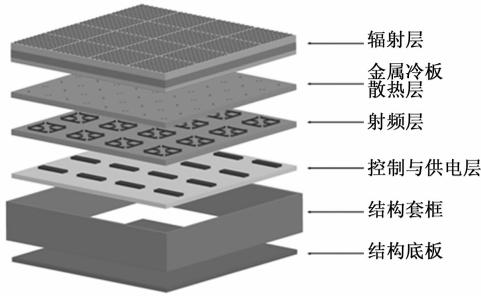


图 2 一体化发射组件结构框图

2 一体化发射组件三维垂直互联设计

针对 ka 频段片式一体化发射组件紧凑结构要求, 开展一体化组件三维垂直互联设计, 包括: 射频层到辐射层低损耗垂直互联、射频馈入信号与射频层的垂直互联、低频控制供电信号的垂直互联。

2.1 射频层到辐射层低损耗垂直互联

射频层到辐射层垂直互联结构位于功放输出之后, 低损耗是实现层间集成的关键^[4], 该技术直接影响到发射组件的效率。

不同层之间的射频垂直互联方式有: 绝缘子、毛纽扣、SMP/mini-SMP、BGA、表贴式等。表贴式、SMP/mini-SMP 垂直互联尽管成本低, 但尺寸较大, 不利于模块的小型化。毛纽扣、BGA 的垂直互联方式虽然尺寸较小, 但装配成本及装配要求高。与其它垂直互联方式相比, 绝缘子的方式同时具有较小的插损, 较小的连接尺寸, 特别适合采用微带焊接的射频馈电形式^[5]。

射频层到辐射层间的垂直互联结构中上层为射频板、中层为绝缘子、下层为辐射单元板。绝缘子的外导体烧结在结构体上, 内导体上下两端分别与射频板和辐射单元板通过焊锡连接。绝缘子与射频板之间存在一段空气腔, 形成类同轴的结构。

采用绝缘子的垂直互联结构, 存在射频传输的不连续, 这将会增加电路的传输损耗并引起电磁辐射导致电路间相互干扰。射频传输的不连续性引入了寄生变量, 在 ka 频段绝缘子的引入相当于引入一段电感, 需要在结构中引入补偿电容抵消电感的影响, 改善信号传输特性^[6]。可对微带线进行拼接引入补偿电容, 补偿电容近似公式如式 (1) 所示:

$$\Delta C = \frac{L_0 + \Delta L - C_0 Z_0^2}{Z_0^2} \quad (1)$$

式 (1) 中, Z_0 是微带线的特征阻抗, L_0 是微带线自身的电感量, ΔL 是微带线和绝缘子互联时的等效串联电感, C_0 为微带线与地之间的等效电容、同轴射频绝缘子的内导体与盒体外层金属间形成的等效电容之和。通过上述公式计算出补偿电容的初值, 补偿电容采用环形微带线实现。为有效改善垂直互连结构在匹配特性, 可在微带线与绝缘子连接处附近增加阻抗变换段。

图 3 为绝缘子与微带线的连接方式示意图, 其中 W_0 为特征阻抗为 50Ω 的微带线宽度, 补偿电容采用环形微带线, 其半径为 R_1 , W_1 和 L_1 为阻抗变换段微带线的长度及宽度。采用电磁场仿真软件 HFSS 建立模型, 为体现绝缘子焊接焊锡的影响, 在模型中增加圆锥形焊锡模型。在仿真模型中, 需要考

虑实际的装配、加工误差以及工艺实现合理性。考虑到以上因素, 最终通过优化上述参数, 得到垂直过渡结构的优化结果如图 5 所示。仿真结果表明, 绝缘子垂直过渡结构中电压驻波比 < 1.25 , 插损优于 0.3 dB 。

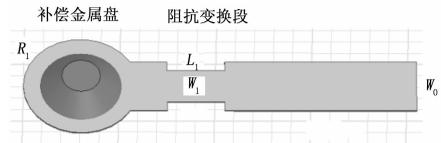


图 3 绝缘子与微带连接方式

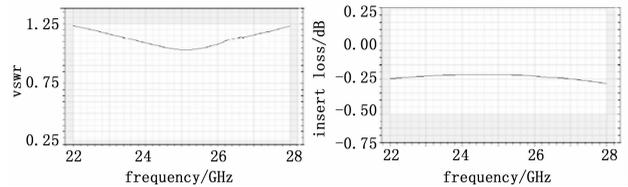


图 4 绝缘子垂直互联仿真结果

2.2 射频馈入信号与射频层的垂直互联

毛纽扣产品通常由镀金铍青铜、镀金钼铜等高弹、高导金丝模压形成圆柱状的弹性连接器。使用时, 将毛纽扣两端压紧置于一定的结构中, 用以达到良好的射频和低频连接效果^[7-8]。毛纽扣采用无焊接连接形式用于射频和低频互联, 可减少传统射频接插件及低频接插件的使用数量, 达到产品小型化, 轻量化的目的^[9-10], 并便于产品返修。

毛纽扣连接主要形式: 同轴结构和三线结构。同轴结构是将毛纽扣作为信号传输的内导体置于介质中, 采用金属框作为同轴结构的外导体, 形成类同轴的形式^[11]。三线结构是将三个毛纽扣置于聚四氟乙烯等介质中, 中间的毛纽扣作为信号传输线, 两边的毛纽扣起到连接地平面的作用。两种结构中同轴结构便于与 mini-SMP 进行一体化集成设计, 便于实现小型化垂直连接同时实现气密封装。

基于毛纽扣特点, 组件采用了一种改进型同轴结构小型化高密度的玻璃烧结 mini-SMP 前端结合毛纽扣实现垂直互联。小型化毛纽扣连接器由外导体、内导体、玻璃体构成 mini-SMP。外导体可采用焊料烧结的形式与盒体固定, 从而实现组件的密封。内导体的一端与毛纽扣进行连接, 毛纽扣置于聚四氟乙烯的介质中。

为保证毛纽扣连接器射频信号传输的完整性, 采用 HFSS 仿真软件, 建立毛纽扣三维传输仿真模型。为减少微波辐射, 选用背面接地的共面波导传输线。共面波导中存在寄生模, 可引起微波传输性能恶化。采用在基板上增加高密度的接地孔, 对共面波导上下地平面进行有效的连接, 可有效抑制寄生模^[12]。与采用绝缘子进行垂直互联的原理相同, 毛纽扣等效在互联结构中引入电感, 需要在共面波导末端用圆盘微带线进行补偿。

在 HFSS 仿真模型中对共面波导接地通孔半径大小与间距、共面波导末端与毛纽扣接触的圆盘直径进行仿真优化, 以改善垂直互联的传输性能。互联结构中毛纽扣与共面波导的连接要保证对位精度, 同时毛纽扣在结构的尺寸设计上要考虑 20% 左右的压缩裕量, 确保挤压下能提供良好的射频与低频弹性连接。

小型化毛纽扣垂直互联试验件在测试夹具上测试结果如下图所示，其在工作频段插损小于 2 dB，驻波比小于 1.5，能够满足组件对垂直互联的插损及驻波比的指标要求。

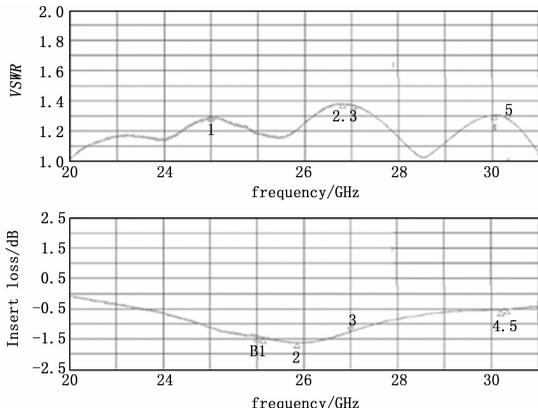


图 5 小型化毛纽扣产品垂直过渡试验件测试结果

2.3 板内射频信号的垂直互联

发射组件在输入端进行射频信号功分后，局部存在射频信号交叉传输，需要在板内实现射频信号的垂直互联。

为降低成本，设计采用微波多层板进行板内垂直互联设计。微波多层印制板主要由多层微波板通过半固化片多次层压制而成。射频信号在微波多层板内垂直互联由缝隙耦合和金属通孔等方式，采用金属通孔过渡，通孔等效为串联电感，因此其射频传输具有低通特性，尽管该结构带宽宽、损耗小，但需要微波多层板得金属化过孔具有很高加工精度，随着频率的升高金属通孔会产生寄生效应，其在高频段的特性会迅速恶化，且指标一致性较差。缝隙耦合的形式虽然插损较大，带宽较窄，但其加工一致性较好，可用于微波多层板实现信号的垂直互联。

射频信号垂直互联采用微波多层板实现，其结构如图 6 所示。多层微波电路包含三层射频图形：表层（射频信号传输层）、中间层（缝隙耦合层）和底层（射频信号底面传输层）。

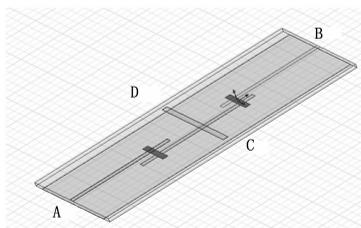


图 6 板内射频信号垂直互联结构图

A 端口的信号通过射频微带线进行传输，在表层微带线下中间层的接地金属中设计合适的开口尺寸、开口位置，将射频信号耦合到底层的射频微带线，底层传输的射频信号通过上述方式再耦合到表层。由于与 C 端口进入的射频信号在不同层进行传输，实现了射频信号的交叉传输及高隔离度。与金属通孔的垂直过渡的三维互联方式相比，该方法易于实现指标的一致性。

根据传输线原理，中间缝隙耦合层通过在共面地板上的二分之一波长的槽线谐振器实现电磁信号的过渡。槽线谐振器至微带线的开路端长度约为四分之一波长，可等效微带线短路接

地，因此射频信号可耦合到槽线谐振器，再由槽线谐振器耦合到下层微带线。

上层和下层微带线端口特性阻抗选择为 50 Ω，对上下层微带线四分之一波长开路支节的长度、槽线低阻抗谐振器的长度及宽度进行仿真优化，得到最佳的仿真结果。仿真结果表明板间垂直互联结构在 ±10% 加工误差内，工作频率下的驻波比小于 1.3，插损小于 2.5 dB，体现了该板内垂直互联结构良好的一致性。

2.4 低频控制供电信号的垂直互联

片式低频控制供电信号垂直互联包含外部互联及板间互联。外部互联需要实现模块的气密封装，采用 9 针气密性排针，针间距 1.27 mm。低频排针烧结在组件结构本体上，一端与外部信号连接，另外一端与组件内部的多层电路板连接。发射组件内部需要实现下层多层板至上层射频板的控制供电信号的连接。如图 7 所示，通过结构本体在中间层金属底板的适当位置开腔，露出下层多层板背面的金丝键合的键合盘，采用深腔金丝键合的形式实现下层多层板到上层的多功能芯片及射频板的小型化连接，与传统的排针及导线的形式相比极大的节省了互联的面积。

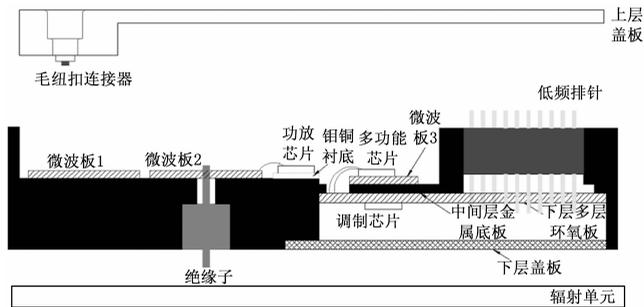


图 7 发射组件组装工艺结构图

3 高密度组装技术

3.1 多功能芯片技术

发射组件在两个方向均受格距限制，设计难度大。高度集成的多功能芯片是实现片式结构 T/R 组件高密度集成和封装的关键技术^[12]。高度集成化的多功能芯片技术可以显著提高一致性，降低成本，缩小体积，增加可靠性，从而提高整体的系统性能^[13-14]。

设计选用了八通道 CMOS 集成多功能芯片，利用片上集成的 1:8 功率分配网络（馈电网络）将 1 路输入信号分为同幅度同相位的 8 路信号，之后 8 路信号经过各自独立的相位和幅度控制，产生不同相位和幅度的信号，再经过片上放大器放大后输出，驱动末级的 GaAs 功率放大器。该多功能芯片的移相器和衰减器分别具有 6 位相位和 5 位幅度控制精度，可以在实现移相功能的同时独立调节每个通道的增益。

使用多功能芯片后，射频链路除了射频信号的功分器芯片外，只用了 2 只多功能芯片、16 只功率放大芯片及电源调制芯片等便实现了发射组件的功能，极大的减少了组件内芯片的数量。

3.2 多芯片组装技术

组件装配工艺同样需要完成多层环氧板、多层微波电路板烧结，低频、高频接插件的气密烧结，功率器件共晶焊接，非功率器件的粘接，芯片间及芯片和电路板间的金丝键合，模块

盖板的气密封装等。

组件组装的工艺如图 7 所示, 该组件分为上下两个平行的层面, 上层微波板上安装多功能芯片及功放芯片, 下层是在结构体进行局部开腔, 并放置环氧多层板, 板上安装电源调制芯片、电阻和去耦电容等。小型化毛纽扣连接器烧结到组件的上层盖板, 低频排针烧结到结构本体中, 上层和下层盖板通过激光封焊实现模块的气密封装。图中射频板 1 与盖板上的毛纽扣弹性接触实现射频信号的垂直互联, 射频板 2 通过射频绝缘子实现与辐射单元的垂直互联。

组件的装配工艺优先选择成熟的工艺路线, 并且合理安排装配顺序, 拉开选用焊料的温度梯度, 避免装配过程中的出现焊料二次熔融。

发射组件中的多功能芯片、电源调制芯片、单层电容等非功率器件采用导电胶与 PCB 板实现可靠性电连接。功率放大器共晶焊接到铝铜衬底上, 然后烧结到壳体, 实现充分散热。组件的平面射频与低频信号主要利用金丝键合线实现信号连接。

4 测试结果与分析

片式一体化发射组件在极小的三维尺寸下 ($48\text{ mm} \times 48\text{ mm} \times 6.3\text{ mm}$) 实现 16 通道装配集成, 并且确保了 16 个通道间射频信号有效的信号隔离。远场测试结果表明在波束士 35° 扫描范围内, $EIRP > 18\text{ dBW}$, 功耗小于 13 W 。通过测试结果分析, 射频层到辐射层垂直互联损耗优于 0.3 dB , 小型化毛纽扣互联结构具有良好的射频传输特性, 采用缝隙耦合的形式实现了板内射频信号的垂直互联。组件内使用的垂直互联技术便于组件装配集成, 实现了组件的小型化, 组件质量小于 100 g 的设计指标。图 8 为发射组件产品实物图。

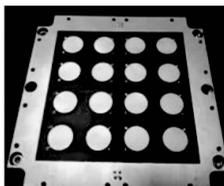


图 8 一体化发射组件实物图

5 结束语

本文将辐射单元与射频发射组件的一体化设计, 采用多功

能芯片技术, 利用微组工艺实现了片式一体化发射组件的高度集成化、小型化。本设计解决了层叠结构高密度装配的射频与低频信号垂直互联等技术问题, 该组件集成度高、较传统组件在尺寸和重量上具有较大的优势, 大大减小了相控阵天线的尺寸, 使其更好地满足高性能有源相控阵雷达的需要。

参考文献:

- [1] Schuh P, Rieger R, Fleckenstein A, et al. T/R—module technologies today and possible evolutions [A]. International Radar Conference—surveillance for A Safer World [C]. 2009; 1–5.
- [2] Abbosh A M. Ultra wideband vertical microstrip—microstrip transition [J]. IET Microwaves Antennas & Propagation, 2007, 1 (5): 968–972.
- [3] 郝金中, 张 瑜, 周 扬. 一种宽带多通道瓦片式 T/R 组件的研制 [J]. 电讯技术, 2015, 55 (1): 108–112.
- [4] 周 骏, 沈 亚, 顾江川. 新型三维立体集成接收模块设计与实现 [J]. 固体电子学研究与进展, 2016 (1): 25–29.
- [5] 严 伟, 吴金财, 郑 伟. 三维微波多芯片组件垂直微波互联技术 [J]. 微波学报, 2012, 28 (5): 1–6.
- [6] 董毅敏. 基于垂直互连技术的上下变频多芯片模块 [J]. 半导体技术, 2015, 40 (8): 580–584.
- [7] 刘江洪. 基于毛纽扣的板级垂直互连技术 [J]. 电子工艺技术, 2016, 37 (3): 135–137.
- [8] 张之光, 徐 正, 刘 骁, 等. 一种用于瓦片式 T/R 组件的垂直互联方式 [J]. 科学技术与工程, 2013 (4): 3104–3108.
- [9] 何毅龙. 一种新颖的 Ka 频段 T/R 组件立体混合集成封装 [J]. 电讯技术, 2012, 52 (7): 1160–1163.
- [10] Bonnet B, et al. 3D packaging technology for integrated antenna front—ends [C]. 38th European Microwave Conference, 2008; 1569–1572.
- [11] 徐 利. 基于毛纽扣的 LTCC 微波模块垂直互连技术 [J]. 固体电子学研究与进展, 2013, 33 (6): 538–541.
- [12] 周 骏, 窦文斌, 沈 亚, 等. 基于 LTCC 技术的表贴式微波模块设计 [J]. 微波学报, 2010, 26 (2): 47–49.
- [13] 刘志辉, 吴明远. 微系统功能模块集成工艺发展趋势及挑战 [J]. 电子工艺技术, 2015, 36 (4): 195–198.
- [14] Mancuso Y, Gremillet P, Lacomme P. T/R—modules technological and technical trends for phased array antennas [A]. European Microwave Conference [C]. 2006.

(上接第 159 页)

4 结束语

根据 Thevenin 动态电池等效模型, 通过 HPPC 实验得到常温下的充放电数据, 利用非线性最小二乘法对数据进行拟合和辨识, 得到实验用磷酸铁锂电池模型。在 Matlab/Simulink 环境下建立了实验电池的仿真模型, 设计了放电实验, 实验证明所建立的电池模型参数辨识合理, 误差不大于 0.1 V , 且不断收敛于真实值, 精度较高。以该模型为基础, 可以设计算法以实现锂电池 SOC 的实时监控。

参考文献:

- [1] 刘胜水, 李 源, 赵振森, 等. 基于 DSP 的电动汽车锂电池荷电状态估算的研究与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23

- (10): 3533–3535.
- [2] Yet H, Liu X T. A new model for State—of—Charge (SOC) estimation for high—power Li—ion batteries [J]. Appl. Energy, 2012, 08: 031–038.
- [3] 张泽宇. 基于决策树模糊等效电路模型的锂电池 SOC 估计方法 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [4] 陈息坤, 孙 冬. 锂离子电池建模及其参数辨识方法研究 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 22 (36): 6254–6261.
- [5] 李振强, 邹丽蓉, 黄 杰. 锂电池的模型参数与荷电状态估计的研究 [J]. 通信电源技术, 2016, 1: 18–21.
- [6] 张 阳, 潘文霞. 带可变参数锂离子电池 Thevenin 模型 [J]. 电源技术, 2013, 137 (5): 755–757.
- [7] 张 宾, 郭连兑, 李宏义, 等. 电动汽车用磷酸铁锂离子电池的 PNGV 模型分析 [J]. 电源技术, 2009, 33 (5): 417–421.