

机动目标 ISAR 超分辨成像的分辨能力研究

孙长印, 保铮

(西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室, 西安 710071)

摘要: 机动目标 ISAR 超分辨成像须考虑三维转动造成多普勒频率的时变性质, 同时, 成像质量也受到信号模型误差的影响, 如包络对齐误差和自聚焦误差. 采用误差参数和目标特征参数联合估计可显著提高机动目标成像的分辨率. 本文将误差参数和目标参数联合建模, 对信号模型解的不唯一性提出一种约束条件, 引入分辨能力的概念, 综合分析了存在这些因素时成像分辨率所受到的限制.

关键词: 超分辨; 机动目标 ISAR 成像; 包络对齐; 自聚焦; 运动补偿; 分辨能力

中图分类号: TN957.52 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2001) 03-0426-03

The Resolution Ability of the Super-resolution ISAR Imaging of Maneuvering Targets

SUN Chang-yin, BAO Zheng

(Key Lab. for Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: In the ISAR imaging of maneuvering targets, the time-varying Doppler spectrum must be taken into account to produce a focused image, and above all, motion induced errors, such as envelope alignment errors and auto-focusing phase errors, must be compensated to get a high quality image. In this paper, a signal model is first established in which the motion compensation errors and the feature of the target are both treated as parameters to be estimated, then a parameter constraint is proposed to cope with the uncertainty in the signal model, and finally the resolution ability of the super resolution algorithm in the established signal is analyzed.

Key words: super-resolution; ISAR imaging of maneuvering targets; envelope alignment; auto-focus; motion compensation; resolution ability

1 引言

在 ISAR 成像中, 雷达静止并发射宽带电磁波, 目标相对雷达运动. 机动目标相对于雷达的运动可分为平动和转动两个分量, 通过包络对齐和自聚焦初相校正的运动补偿后, 目标的平动分量被补偿, 只剩下围绕“焦点”的转动. 这种转动可分为偏转 (yaw)、俯仰 (pitch) 和侧摆 (roll) 三个分量. 这三个分量的大小可能为常数, 也可能随时间变化.

由于成像观测期间目标的转角很小, 可近似认为目标散射点位置的变化只影响子回波的相位, 而不影响包络, 即在观测期间各距离单元里的散射点没有游动. 在这一假定条件下, 成像原理和算法均可简化, 而上述假定通常是可以满足的.

文献[1, 2]考虑目标机动飞行时, 由于多普勒随时间变化, 造成传统的 R-D 算法失效, 提出了基于时频分布分析的成像算法. 文献[3]在波数空间对机动目标成像原理进行分析的基础上, 提出基于一阶模型的参数估计超分辨成像算法, 并给出了不同时刻由三维转动所成不同视角的实测目标投影的动态像.

上述成像方法是在运动补偿的基础上, 按运动补偿完全准确的信号模型作参数估计. 实际上, 运动补偿不可能完全准

确, 所成图像与实际 (理想) 图像相比仍然存在散焦. 对超分辨成像而言, 这种信号模型误差与实际情况的不一致将使成像质量严重下降. 雷达成像超分辨处理的发展趋势之一为运动误差与目标参数的联合估计^[4], 这种做法源于阵列信号处理中利用方向参数和误差参数联合估计的思想实施方向估计和误差校正^[5]. 本文从超分辨处理的角度出发, 将机动目标运动补偿的残余误差与目标特征参数联合建模, 即将它们亦作为待估计参数. 同时引入分辨能力的概念, 来分析存在包络对齐误差、自聚焦误差、目标三维机动飞行及杂波噪声这几种因素时对成像分辨率造成的限制.

2 机动目标 ISAR 成像及信号模型

设目标相对雷达的转动如图 1 所示, 机首为 x 方向, 机身平面为 $x-y$ 平面, 与机身平面垂直的方向为 z 轴. 雷达视线方向的单位向量为: $R = [\cos \alpha \cos \beta, \cos \alpha \sin \beta, \sin \alpha]^T$, 三种转动表示为: 偏转 $v = [0, 0, v]^T$, 俯仰 $p = [0, p, 0]^T$, 侧摆 $r = [r, 0, 0]^T$.

考虑到雷达发射的是长时宽的线频调信号, 以参考点的信号为准作解线频调处理, 并对信号以 F_s 的频率采样. 这样, 对目标上任一点 r , 在成像期间以转动向量 u 为轴转动了空

间角 β ，设转动前该点的向量为 $r_0(x, y, z)$ ，转动后该点的向量为 $r_1(x, y, z)$ 。该点由于转动而产生的多普勒频率为^[1]：

$$f_d = \frac{4}{c} [(u \times r_1) \cdot R] \\ = \frac{4}{c} [(R \times u) \cdot r_1] \quad (1)$$

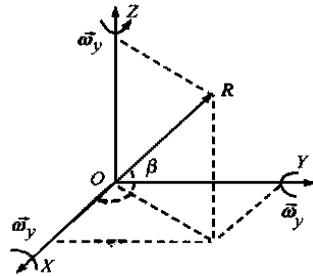


图 1 ISAR 成像坐标系

下面仅讨论目标一种简单运动情况，雷达基本处于追尾状态，而通过运动补偿，等价的转台目标（以转台轴心为原点）作匀速偏转 + 匀速俯仰转动。设此时转动单位向量为 $u = [0, 1/\sqrt{2}, 1/\sqrt{2}]^T$ ，则由文献[6]知回波信号的纵向频率为 $f_r = -(2/c) y / F_s$ ，由式(1)得横向多普勒频率为 $f_d = -(2f_0/c)(x_y + z_p + y_y)$ ，式中 f_0 、 c 分别是雷达载频和调频率。显然，信号的纵向频率正比于纵向距离，而横向多普勒频率除了与横向距离成线性关系外，还有时变项，且该项与纵向距离成正比。

将简单情况推广到一般情况，即目标做任意的三维转动，且转动是不均匀的。可以想像，纵向分辨的情况没有变换，但多普勒频率的情况是复杂的，而且各散射点间没有简单的联系。将讨论的范围作一些限制，即在成像期间多普勒的时变可以作一阶近似。由于飞机一类机械惰性较大的目标，在很少几度的转角过程，这一近似一般可以满足。于是，可将回波信号以二维频率写成下述形式：

$$\tilde{s}(m, n) = \sum_{k=1}^K \tilde{\mu}_k \exp[j2(mf_k + n\tilde{f}_k) + j\tilde{\mu}_k n^2] \quad (2)$$

式中 $k=1, 2, \dots, K$ 为散射点的编号， $\tilde{\mu}_k$ 、 f_k 、 \tilde{f}_k 和 $\tilde{\mu}_k$ 分别对应于第 k 个散射点子回波的幅度、纵向频率、横向频率及调频率。上述模型显然未考虑运动补偿的误差。初相校正的误差表现为各次回波的附加初相 $\tilde{\mu}_n (n=0, 1, \dots, N-1)$ ，而包络对齐的误差表现为各次回波有附加的解线调频率 $\tilde{\mu}_n (n=0, 1, \dots, N-1)$ 。考虑这两项误差的影响及存在噪声时，回波信号的二维表示式可写为：

$$y(m, n) = \tilde{s}(m, n) \exp(j\tilde{\mu}_n m + j\tilde{\mu}_n n) + e(m, n) \quad (3)$$

式中 $e(m, n)$ 为加性噪声。

从式(3)的信号模型，可以对各参数进行估计，从而完成运动补偿和成像处理。但需要指出，与阵列信号处理中等距阵的误差校正问题类似，式(3)信号模型中的诸参数间有下述相关耦合的不确定性：将式(3)中 $\tilde{s}(m, n)$ 的所有 K 个 \tilde{f}_k 和 $\tilde{\mu}_k$ 分别加相同的数 \tilde{f} 和 $\tilde{\mu}$ ，同时若将 $\tilde{\mu}_n$ 增加 $\tilde{\mu}_n = -j2(\tilde{f}n + j\tilde{\mu}n^2)$ ，则式(3)的表达式不变。但与阵列信号处理中波达方向绝对值的估计不同，雷达成像问题中散射点频率的相对值决定目标形状，而绝对值只使图像整体平移。显然上述的不确定性只影响频率的绝对值，对于频率的相对值（图像中目标之间的相互关系）没有影响。另外， $\tilde{\mu}_0$ 的绝对值只影响纵向频率估计的绝对值，也不影响相对值。这样，对误差参数引入下述约束： $\tilde{\mu}_0 = \tilde{\mu}_1 = \tilde{\mu}_2 = 0$ 和 $\tilde{\mu}_0 = 0$ ，上述的不确定性

得到消除，冗余的变参数剔除，而对成像没有影响。在这样的约束条件下，通过求解方程组得到一组新的变参数：

$$k = \tilde{\mu}_k \exp(j\tilde{\mu}_0), k=1, 2, \dots, K \quad (4)$$

$$n = \tilde{n} - \tilde{n}_0 - (2\tilde{\mu}_1 - \tilde{\mu}_2/2 - 3\tilde{\mu}_0/2)n - (\tilde{\mu}_2/2 - \tilde{\mu}_1 + \tilde{\mu}_0/2)n^2 \quad (5)$$

$$\tilde{f}_k = \tilde{f}_k + (2\tilde{\mu}_1 - \tilde{\mu}_2/2 - 3\tilde{\mu}_0/2)/2 \quad (6)$$

$$\mu_k = \tilde{\mu}_k + (\tilde{\mu}_2/2 - \tilde{\mu}_1 + \tilde{\mu}_0/2) \quad (7)$$

$$n = \tilde{n} - \tilde{n}_0 \quad (8) \quad f_k = \tilde{f}_k + \tilde{\mu}_0/2 \quad (9)$$

在这组新的变参数中， n 只有 $N-3$ 个待定参数，而 n 只有 $N-1$ 个待定参数。用新参数表示的信号模型为：

$$y(m, n) = s(m, n) \exp(j\mu_n m + j\mu_n n) + e(m, n) \quad (10)$$

式中 $s(m, n) = \sum_{k=1}^K \mu_k \exp[j2(mf_k + n\tilde{f}_k) + j\mu_k n^2]$ (11)

有了式(10)，就可以用它来估计成像参数，从估计得到的各散射点的纵向频率 f_k 、横向频率 \tilde{f}_k 和幅度 $\mu_k (k=1, 2, \dots, K)$ ，可以重构观测起始时刻的目标距离-多普勒像，而从估计得到的调频率 $\tilde{\mu}_k$ ，还可重构观测期间的动态像。

3 机动目标超分辨成像的分辨能力

对于式(10)的信号模型，其最大似然(ML)估计值在本文噪声的假设下为高斯分布。对于二维平面上的频率对 (f_k, \tilde{f}_k) 及其估计值 $(\hat{f}_k, \hat{\tilde{f}}_k)$ ，令： $f_k = (f_k, \tilde{f}_k)^T$ ， $\hat{f}_k = (\hat{f}_k, \hat{\tilde{f}}_k)^T$ ， $k=1, 2, \dots, K$ ， C_k 为其估计值的协方差矩阵，则估计值 \hat{f}_k 的边缘概率密度函数为：

$$f(\hat{f}_k) = \frac{1}{2\sqrt{\det(C_k)}} \exp(-(\hat{f}_k - f_k)^T C_k^{-1} (\hat{f}_k - f_k)/2) \quad (12)$$

显然，对不同的概率值，上式对应于一系列以 f_k 为中心的椭圆。椭圆的长短轴分别由 C_k 的两个特征值决定，椭圆的倾斜度则与 $f_k = (f_k, \tilde{f}_k)^T$ 两元素的耦合有关，若 f_k 和 \tilde{f}_k 之间无耦合，则为正椭圆。 C_k 可由 CR 界矩阵得到（详见文献[7]）。

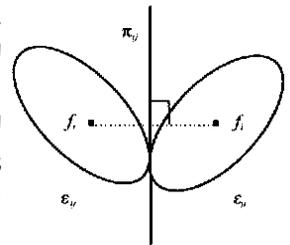


图 2 两点的分辨区域

对两个散射点，在二维频率平面上将散射点 f_i 和 f_j 连接，作 f_i 和 f_j 连线的中垂线 ij ，如图 2 所示。对于 f_i ，定义与中垂线 ij 相切的等边际概率密度曲线（椭圆 ij ）所成的区域为其分辨区域：

$$R_i = \{f_i | R^2 | (f_i - f_i)^T C_i^{-1} (f_i - f_i) \leq r_{ij}^2\} \quad (13)$$

该区域由下式所示的椭圆围成：

$$ij = \{f_i | R^2 | (f_i - f_i)^T C_i^{-1} (f_i - f_i) = r_{ij}^2\} \quad (14)$$

式中 r_{ij} 为正实数，并决定了分辨概率，分辨区域和分辨概率构成了对该点的分辨能力。

多散射点情形，对任一散射点 f_k ，采用与上述两散射点情形相似的做法，分别做 f_k 与 f_j 连线的中垂线 $kj (j=1, 2, \dots, K, j \neq k)$ ，然后做与 kj 相切的椭圆 kj ，定义第 k 个散射点的分辨区域为：

$$\mathbf{R}_k = \{ \mathbf{f}_k \quad R^2 | (\mathbf{f}_k - \mathbf{f}_k)^T \mathbf{C}_k^{-1} (\mathbf{f}_k - \mathbf{f}_k) \leq r_k^2 \} \quad (15)$$

式中 $r_k = \min_{j=1,2,\dots,K,j \neq k} \{ r_{kj} \}$, r_{kj} 与椭圆 k_j 相对应, 经过简单的几何关系可以证明^[8]:

$$r_{kj}^2 = \frac{1}{4} \frac{(\mathbf{f}_k - \mathbf{f}_j)^T (\mathbf{f}_k - \mathbf{f}_j)}{(\mathbf{f}_k - \mathbf{f}_j)^T \mathbf{C}_k (\mathbf{f}_k - \mathbf{f}_j)} \quad (16)$$

由于 $(\mathbf{f}_k - \mathbf{f}_k)^T \mathbf{C}_k^{-1} (\mathbf{f}_k - \mathbf{f}_k)$ 是 2 自由度的 χ^2 分布, 所以第 k 个散射点与 r_k 相对应的分辨概率为:

$$P_r = 1 - \exp(-r_k^2/2) \quad (17)$$

需要指出, 从式(16)及式(17)可以看出, 分辨函数不但与 $\{f_k\}_{k=1}^K$ 有关, 且与 $\{C_k\}_{k=1}^K$ 有关, 而 $\{C_k\}_{k=1}^K$ 中则包含了诸多因素的影响。

4 机动目标成像分辨率的数值分析

成像雷达参数如表 1 所示, 仿真数据由雅克 42 飞机上的多个散射点产生, 散射点位置如图 3~4 中的“+”号所示。机头处散射点的幅度最小, 为 0.1, 从机头到机尾依次递增为 1.0, 机翼上散射点的幅度最强, 为 2.4。机长 21 米, 宽 12.7 米, 机尾高 4.25 米。

ISAR 参数	符号	数值
波长		0.06 米
距离分辨率	r	0.5 米
横向距离分辨率	a	0.5 米
中心距离	R_0	10000 米
采样率	F_s	21.3MHz
图像大小	$M \times N$	64 x 64
转角		0.05rad

首先对不同姿态变化的成像分辨率进行数值分析, 假设运动补偿正确, 成像质量主要受噪声影响, 图 3.1-2 分别为目标依次做匀速偏转、匀速俯仰运动时的分辨概率等高图(圈内分辨概率相同, 近似为 1)。从图中可以清楚的看到, (1) 雷达对目标的成像分辨能力首先取决于目标相对于雷达的运动, 如图 3.1 偏转转动形成对目标长和宽两方向的分辨能力, 图 3.2 俯仰转动形成对目标长和高度两个方向的分辨能力。所以综合利用机动飞行的多维转动成像, 可获得对目标三维的分辨能力, 这也验证了文献[3]的实验结果。(2) 成像分辨率还取决于目标散射点的相互位置, 如图 3.2 机头上的三点, 由于相距较远, 分辨区域为圆形, 表示在二维方向有相同的分辨能力。而图 3.2 中间两点(见放大图), 由于机翼散射点与机身散射点的重叠, 相距很近, 分辨区域为长轴在距离方向的椭圆, 说明距离方向分辨能力的下降。(3) 散射点信号的幅度越大, 分辨区域越小, 分辨率越高, 如机翼尖上的散射点, 反之, 分辨率越低, 如机头。

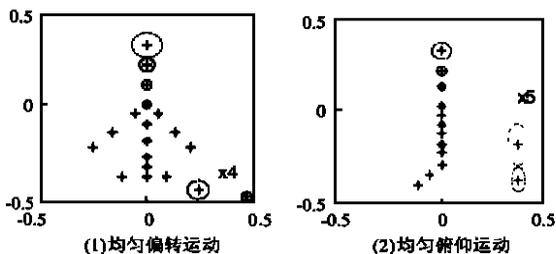


图 3 目标机动飞行时的分辨能力图

其次考虑自聚焦误差及包络对齐误差对成像分辨能力的

影响。图 4.1 中自聚焦误差为方差为 0.1 的随机误差, 图 4.2 中包络对齐误差为方差为 0.1 个距离单元的随机误差。比较图 4.1 和图 4.2 可以看到, 尽管自聚焦误差及包络对齐误差均为非空变的误差, 但它们的存在所造成的影响表现不同, 自聚焦误差使得图像在横向距离方向的分辨率有小的下降, 而包络对齐误差的存在使分辨区域成为斜椭圆(见放大 10 倍的图), 这预示着使得图像在两维的分辨率均有下降, 且两维影响有耦合。包络对齐误差使得两维参数估计耦合的原因可通过将 \tilde{z}_n 对 n 作幂级数展开看出, 设 $\tilde{z}_n = c_0 + c_1 n + \dots$, 则包络对齐的相位误差为 $\tilde{z}_n m = c_0 m + c_1 m + \dots$, 显然存在两维耦合项。

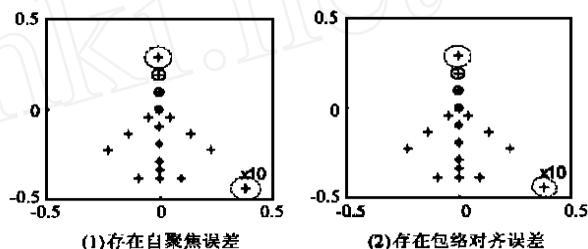


图 4 自聚焦误差和包络对齐误差对分辨能力的影响

5 结论

机动目标成像质量除受到三维转动的影响外, 同时也受到包络对齐误差、自聚焦误差的影响。本文引入分辨能力的概念, 综合分析了存在这些因素时成像分辨率所受到的限制。通过数值分析, 得到以下结论: 1. 综合利用机动飞行的多维转动, 可获得对目标三维的成像分辨能力。2. 包络对齐误差使得图像在两维的分辨能力均有下降。自聚焦误差仅影响横向距离方向的分辨率。

作者简介:



孙长印 1963 年出生, 1984 年和 1990 年分别获得西安交通大学电子工程系学士、硕士学位。现在西安电子科技大学攻读博士学位。目前主要从事信号处理、雷达成像等方面的研究。

保 铮 (见本期第 328 页)

参考文献:

[1] Bao Z., Wang G. Inverse synthetic aperture radar imaging of maneuvering targets [J]. Opt. Eng., May, 1998, 37(5): 1582-1588.
 [2] Chen V. C., Miceli W. J. Time-varying spectral analysis for radar imaging of maneuvering targets [J]. IEE Proc. - Radar, Sonar Navig., October, 1998, 145(5): 262-268.
 [3] Bao Z., Sun C., Xing M. Principle and algorithm of inverse synthetic aperture radar imaging for maneuvering targets [J]. Received by IEEE Trans. on AES, 1999.

(下转第 431 页)

若使用三色打印,则可直接用打印驱动程序调用这些数据实现 RGB \rightarrow CMY 转换并打印;若使用四色打印,则还需利用数据 (K_i, R_i, G_i, B_i) 寻找 RGB \rightarrow K 的规律,采用 UCR 方法^[6]对黑色 K 单独处理。另外,为控制墨水输出量,防止因墨水过多导致纸被打透,还应从样本数据中学习出人眼对 C、M、Y、K 色彩分辨力的饱和值,将图像的色彩和亮度变化的动态范围压缩到学习出的饱和值范围内(详见文献^[3])。

4 实验结果的误差分析

利用 Canon BJC-465 彩色喷墨式打印机、选择误差扩散抖动方式、BCF-21e 墨水、HR101 纸,在 CMYK 方式下,打印 200 组单色色块及 576 组混色色块。

用单色学习结果对混色样本数据计算误差及增加混色样本数据的学习后,再对混色样本数据计算误差,结果见表 1。

表 1 误差结果比较

方案	平均色差			平均 色差
	C	M	Y	
单色学习方案	34.7	32.7	23.9	70.63
混色学习方案	- 0.000096	- 0.000007	- 0.000010	18.57

5 结束语

色彩匹配的最终目标是发现从 RGB \rightarrow CMYK 转换的非线性函数关系,而实际中是很难找到一个合适的非线性函数的,误差最小的是多维插值查找表法,但实时处理时大量的查表和插值运算又会导致打印速度过慢,不能实用。而 RGB \rightarrow CMYK 转换不同于 CMYK \rightarrow RGB 转换,它追求的不仅仅是精确性,更主要的是对墨水、纸张和抖动方式的适用性以及打印速度的高效性。因此,许多情况下,我们只能对这种非线性关系作线性逼近。

本文通过在算法中加入对混色数据的学习,使 RGB \rightarrow CMYK 转换时的平均误差变小了,在不降低打印速度的情况下,提高了色彩匹配的精度,这种利用多元数据分析来解决色彩匹配中混色数据学习问题的方法,虽然在误差方面不如插值查表法,但其最主要的优点是具有学习功能,可通过对墨水、纸张等特性的学习,得到不同的匹配参数用于打印。由于学习程序和打印程序具有通用性、适应性,因而可以实现色彩匹配的自动化,同时由于学习程序与打印程序是分离的,所以学习算法的复杂性不会影响最终的图像打印速度,因此,打印

速度比较快。存在的问题是,目前所采用的模型本质上仍属于线性模型,总体误差虽很小,但个别样本的误差还较大,有效的解决途径是选择恰当类型的非线性曲线,建立非线性回归方程,正如前文所说,这是一项比较困难的工作,目前,这项工作还在研究之中。

参考文献:

- [1] Bezerra, C. M., Hawkyand, C. J., Kulube, H. M., Reyner, S. Color matching for ink-jet prints on paper [J]. Color Research and Application, 1998, 23(1): 18 - 26.
- [2] 钱国良,陈彬等. 基于机器学习的彩色匹配技术 [J]. 软件学报, 1998, 9(11): 845 - 850.
- [3] 苏晓红,王亚东,郭茂祖. 基于样本空间学习算法的彩色匹配方法研究 [J]. 自动化学报, 2001.
- [4] 任若恩,王惠文. 多元统计数据分析——理论、方法、实例 [M]. 北京:国防工业出版社, 1997: 149 - 153.
- [5] (日)大田 登著,刘中本译. 色彩工学 [M]. 西安:西安交通大学出版社, 1997: 164 - 166.
- [6] Okatsu, Murai, Kita. High accurate color transformation based on UCR [A]. Japan Hardcopy Papers Collection 94 [C], Tokyo, 1994: 177 - 180.

作者简介:



苏晓红 1966 年出生, 博士生, 副教授。分别于 1988 年、1991 年获哈尔滨船舶工程学院学士、硕士学位。研究方向为计算机图形学、数字图像处理、色彩匹配技术。



郭茂祖 1966 年出生, 博士, 副教授。分别于 1988 年、1991 年获哈尔滨船舶工程学院学士、硕士学位, 1997 年获哈尔滨工业大学博士学位。研究方向为机器学习、色彩匹配技术、非数值并行计算。

(上接第 428 页)

- [4] Liu Z. S., Li J. Synthetic-aperture-radar motion compensation and feature extraction by means of a relaxation-based algorithm [J]. J. Opt. Soc. Am. A, 1998, 15(3): 599 - 610.
- [5] Weiss A. J., Friedlander B., Eigenstructure methods for direction finding with sensor gain and phase uncertainty [J]. Circuits, System & Signal Processing, 1990, 9(3): 271 - 300.
- [6] Carrara W. et al. Spotlight Synthetic Aperture Radar: Signal Processing Algorithms [M]. Artech House, Boston, 1995.
- [7] 孙长印. SAR/ISAR 超分辨成像研究 [D]. 博士学位论文, 西安电子科技大学, 2000.
- [8] Sheba M., Li J., On the Resolvability of Sinusoidal Parameter Estimates [J]. IEEE Trans. on AES, April, 1998, 34(2): 448 - 455.