

海面毛细-重力波谱非线性特征 对微波发射率影响的研究

郑全安 孙元福 徐承德

(国家海洋局第一海洋研究所, 青岛)

滕叙究 杨广林 赵仁宇

(中国科学院长春物理研究所)

摘 要

本文依据海洋微波遥感与海浪动力学研究成果以及现场实测数据, 研究低海况海面波斜率谱的非线性特征对微波发射率的影响, 揭示出海面毛细-重力波对微波的布拉格散射效应, 不仅影响海面散射测量结果, 而且对海面微波辐射也有着明显影响。这种影响反应为海面垂直极化微波发射率随海面摩擦风速 u_* 的变化曲线存在下凹区。实测结果还表明, 海面微波发射率随风向变化, 这也证明了海面毛细-重力波的方向性不仅影响散射测量, 也影响辐射测量。

根据这些研究成果, 提出了利用多波长微波辐射计对毛细-重力波波谱进行现场测量的可能性, 并指出在利用微波辐射方法测量除风场之外的海洋物理量时, 必须对海面粗糙度的影响进行校正, 或选择测量时机, 避开海况影响。

一、引 言

微波遥感对海洋学研究有着特殊意义。这不仅因为微波遥感具有全天时、全天候探测能力, 还因为海面上发生的运动过程会对微波产生作用, 从而使遥感数据中包含着丰富的海面信息。作为海洋微波遥感的重要组成部分, 海面微波辐射遥感在过去 20 年中无论在理论研究和现场测量方面都得到了重视和发展。已经有许多成果发表^[1-5]。目前已经成为探测海洋的基本星载遥感方法之一。我国的机载微波辐射计已于 70 年代研制成功, 并于 70 年代末应用于海洋环境遥感研究^[6]。

微波辐射测量方法的重要用途之一是推算海面风速。这是由于海面微波发射率与海面粗糙度和泡沫复盖有关, 而后者与海面风速相联系, 因而测得海面微波辐射亮度温度(或发射率)数据, 可以推算出风速。可是, 微波发射率与风速之间并不是简单线性关系。一方面由于风对海面的摩擦产生的毛细波和重力波, 波浪破碎产生的泡沫和飞沫等对海面微波辐射均有贡献, 这些风的产物与风本身的关系相当复杂。另一方面, 在海况相同情况下波长和极化方式不同,

微波辐射计的接收入射角不同,海面微波发射率也不同。所以,尽管已经做了大量研究,取得了许多成果,然而,海面发射率与粗糙度之间确切的内在关系至今尚不明瞭。

本文以已有的微波遥感与海浪动力学研究成果以及现场实测数据为依据,探讨低海况海面波斜率谱非线性特征对微波发射率的影响,揭示出海面毛细-重力波对微波的布拉格散射效应,不仅在主动式微波遥感问题中(如用微波散射计测量海面风速)应加以考虑,而且对海面微波辐射有着明显影响。利用布拉格散射理论很好地解释了低海况情况下,海面垂直极化微波发射率随摩擦风速 u_* 的变化规律。

二、毛细-重力波斜率谱特征

出现在海面上的以表面张力为主要回复力的波动叫作毛细波。毛细波的波长范围为 $0.5-2\text{cm}$, 时间尺度为 10^{-1} 至 10^{-2}s 。对这种微尺度波动的研究从前没有引起足够的重视,原因是毛细波所包含的能量很小,在整个波浪场能量构成中所占的比重微乎其微,人们往往不去注意这种微观过程;加之,由于尺度小,不能用通常的测波仪器测量,现场实测数据较为难得,研究工作难以开展。近年来,由于海洋微波遥感技术的发展,促进了对毛细波动力与统计特性的测量与研究。因为微波遥感常用的微波波长与毛细波(或波长很短的重力波)波长为同一量级,后者会对前者产生布拉格散射作用,这不论在雷达图像分析解译中,还是在散射计数据处理中都是应加以考虑的因素。从海洋学角度看,虽然毛细波能量很小,但它们是风生波长成过程的初始阶段,研究它们的各种特性,对于认识风与海面波浪之间的确切关系有着重要意义。激光技术和计算机技术的发展也为这项研究工作提供了可能性。

Long 和 Huang^[7] 在实验室内对毛细-重力波斜率谱进行了测量,图 1 为他们的测量结果。图 1 中每一条谱线对应为一种风速,最下边一条曲线对应的风速为 $3.36\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 最上为

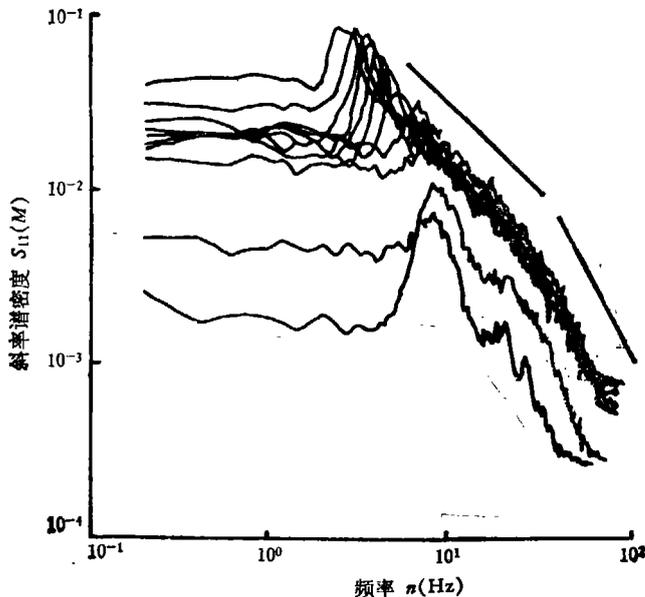


图 1 实验室内测得的毛细-重力波斜率谱^[7]

$12.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。可以看到,斜率谱的外型大体相似,每一条谱线均有一个峰(称为波谱超射 overshoot),随着风速增大,超射位置向低频端移动。

实验室研究结果还表明,对某一频率的毛细-重力波,其斜率谱 S 随风摩擦速度 u_* 成长,但不是线性或单值函数关系。作为一个例子图 2 示出频率为 13.5Hz 的波浪斜率谱随风速 u_* 的成长过程。在 u_* 为 $20\text{--}30\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 范围内出现的突峰也称为超射。不同频率的波,超射出现的位置也不同^[8]。例如频率为 2.1Hz 时,超射中心位置为 $u_* = 83\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$; 频率为 56Hz 时,超射中心位置为 $u_* = 15\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

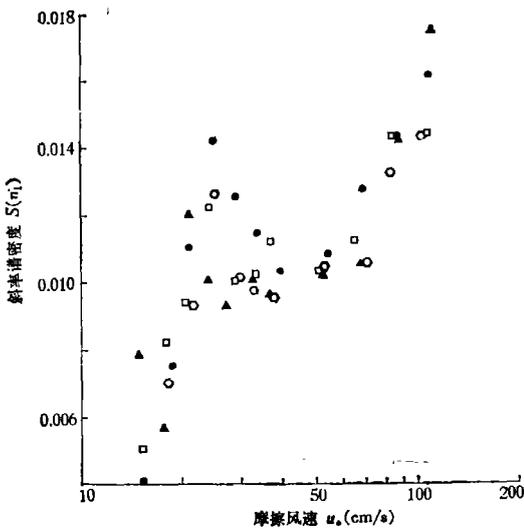


图 2 13.5Hz 波浪的斜率谱随风速 u_* 的成长过程
(超射出现在 $20\text{--}30\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间)

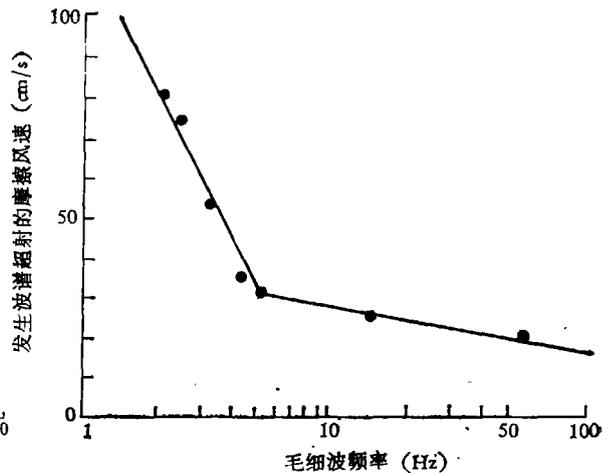


图 3 斜率谱超射与 u_* 的关系

三、布拉格散射效应

对海面的微波散射特性已有许多理论研究与实测成果。通过测量海面散射系数推算海面风速的专用传感器——微波散射计,已呈载使用。本节不讨论通常的海面散射问题,而着力研究海面毛细-重力波对微波的布拉格共振散射对海面散射系数与发射率测量结果的影响。

当一束电磁波照射到具有规则起伏的目标之上,可以推出发生布拉格散射效应的电磁波长与目标规则起伏间距之间的关系:

$$2\lambda_i \sin \phi = m\lambda_r \tag{1}$$

式中 λ_i 为目标规则起伏间距(或波长), ϕ 为掠射角(入射角的余角), λ_r 为电磁波波长, m 为布拉格散射的阶数。

对海洋微波遥感情况,只要满足(1)式,布拉格散射效应同样应该发生。实际上目前使用的微波传感器工作波长均为厘米量级,这与海面上广泛存在的毛细波(或短重力波)波长在同样范围之内。因而,布拉格散射效应对这些传感器输出产品(数据,曲线或图像)的影响都是不容忽视的。

海浪是一种随机过程,对某一时刻,只有波浪场的某些谱分量满足(1)式。于是,布拉格效应的强弱则取决于满足(1)式的波在天线足印复盖的海面上出现的数量多寡。这就与海面毛细-重力波谱的研究联系起来。

Huang 等人已经讨论并证明了海面毛细-重力波的一阶布拉格散射效应对微波散射计测量结果的影响^[4]。本研究将证明布拉格散射效应同样会反映在微波辐射计测量结果中,而且不仅要考虑一阶,还要考虑高阶效应。

四、布拉格散射效应在海面微波发射测量结果中的反映

当目标为镜面时,根据互易定理,达到热平衡后,镜面发射率 ϵ 可以用镜面反射率 Γ 来表示:

$$\epsilon(\theta_i, p) = 1 - \Gamma(\theta_i; p), \quad (2)$$

式中 θ_i 为入射角, p 为极化。

当目标为粗糙表面时,上式中的 Γ 应理解为散射系数。利用收发分置散射系数, Peake 导出了 Γ 的解析表达式:

$$\Gamma(\theta, \phi) = \frac{1}{4\pi \cos\theta_0} \int [\sigma^v(\theta_0\phi_0; \theta_i, \phi_i; p_0, p_i) + \sigma^h(\theta_0, \phi_0; \theta_i, \phi_i; p_0, p_i)] d\Omega, \quad (3)$$

式中 $d\Omega = \sin\theta_i d\theta_i d\phi_i$, 积分在上半平面进行, (θ_i, ϕ_i) 为散射波传播方向, p_0, p_i 分别代表垂直和水平极化^[10]。

从(2)式可以看出,发射率 ϵ 的大小与散射系数 Γ 为负相关关系,也就是说如果目标表面上存在和发生的现象(或过程)对 Γ 有贡献,那么,也必然对 ϵ 有贡献;并且,贡献的符号相反——使 Γ 增大时,则必将使 ϵ 减小。当海面与微波发生布拉格共振散射现象时, Γ 显然会增大, ϵ 则相应减小。这种现象,实际上已经反映在已有的海面微波发射测量结果中,只不过没有引起人们的注意,往往被当作测量数据的噪声而平滑或忽略掉了。

图4为 Pandey 等人^[5]根据 Seasat 1 卫星微波辐射计数据计算出的海面垂直极化发射率随风速的变化,微波频率为 10.7GHz (波长为 2.80cm),入射角为 48.8°。图中圆点为遥感数据点,折线为数据点平均值连线。可以看到曲线中部是下凹的。上述微波波长(2.80cm)与入射角(48.8°)对应的引起布拉格散射的海面毛细-重力波前五阶波长分别为 2.13, 4.25, 6.39, 8.52 和 10.65cm, 这些波长的海面波斜率谱超射中心位置所对应的风速(19.5m)为 9.0, 9.6, 9.9, 12.4 和 14.2m/s (参考图3)。这些风速的位置已用竖虚线标在图4中。很明显,这些虚线均落在 ϵ 的下凹区范围之内,可以认为正是海面毛细-重力波的布拉格散射效应引起了 ϵ 测量值下凹。

同样的现象也出现在 Hollinger^[9] 的测量结果中,他使用的微波频率为 19.34GHz (波长 1.55cm),入射角为 55°。与此对应的海面波布拉格散射前五阶波长为 1.35, 2.70, 4.05, 5.40 和 6.75cm, 这些波长的海面波斜率谱超射中心位置对应的风速(10m)为 7.3, 8.2, 8.3, 8.5 和 9.8m/s。这些风速位置也用竖虚线标在图6中。十分明显竖虚线位置与海面亮度温度下凹区相对应。这是海面毛细-重力波的布拉格散射效应影响微波发射测量结果的又一证据。

1983年我们利用国产微波辐射计,在渤海湾测得的海面发射率随风速的变化也反映出这

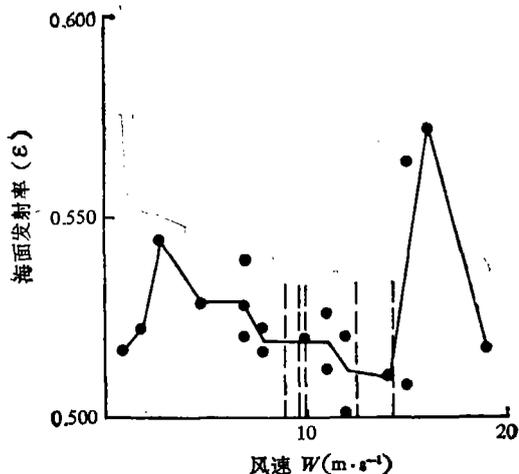


图 4 Pandey 等人测得的海面 2.80cm 微波垂直极化发射率随风速变化与满足布拉格散射条件的毛细-重力波波谱超射出现位置的比较

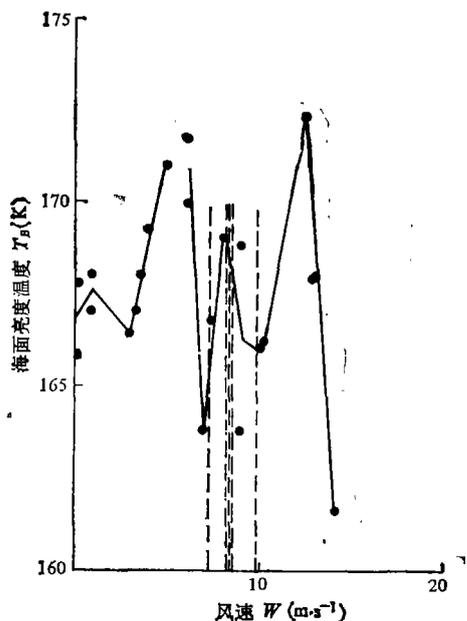


图 5 Hollinger 测得的海面 19.34GHz 微波垂直极化亮度温度随风速变化与满足布拉格散射条件的毛细-重力波波谱超射出现位置的比较

种现象。所用微波辐射计工作频率为 35.3GHz (波长 0.85cm), 当入射角为 50° 时, 前五阶布拉格散射波长为 0.66, 1.32, 1.98, 2.64 和 3.30cm, 这些波长的海面波斜率谱超射中心位置所对应的风速 (10m) 为 6.1, 7.3, 8.0, 8.2 和 8.3m/s。 尽管测量时风速变化范围较小, 只把一阶布拉格波长复盖在发射率下凹区范围之内, 其他各阶没有数据作比较, 但测量结果反映出来的现象与前两例是一样的, 都说明海面毛细-重力波产生的布拉格散射效应是引起海面微波发射率 (或亮度温度) 随风速变化曲线出现下凹区的根本原因。

如前所述, Huang 等人已经讨论并证明了海面毛细-重力波一阶布拉格散射效应对微波散射计测量结果的影响。 实际上高阶 ($m > 2$) 布拉格散射效应也同样存在明显影响。 以海洋卫星散射计 (SASS) 为例, 工作频率为 14.6GHz (波长为 2.05cm), 入射角为 55°。 前五阶布拉格散射波长为 1.79, 3.58, 5.37, 7.16 和 8.95cm。 而这些波长的海面波斜率谱超射中心位置对应的风速 (19.5m) 分别为 8.5, 9.4, 9.8, 11.3 和 13.1m/s。 也就说在这些风速附近, 如不加校正, SASS 测得的风速会高于实测风速。 将上述风速值标到 SASS 与实测值对比的曲线中, 就发现这一预言不仅对一阶布拉格散射是正确的, 且对高阶, 特别是四阶、五阶都很好成立。

海面微波发射率和散射系数一样受毛细-重力波支配的另一个证据是发射率随风向的变化。 图 8 示出了 1984 年 9 月在南黄海利用船载 3cm 微波辐射计 (灵敏度为 1K) 测得的海面微波发射率随风向的变化。 测量是在低海况 (风速 3.1m/s) 下进行的, 以避免涌浪的遮蔽效应。 采用大入射角 (60°) 以避免船体辐射的影响。 测量点设在开阔海上, 以避免陆地辐射的影响。 风向的变化是通过改变辐射计天线方向等效来实现的。

从图 8 可以看出, 海面发射率随风向的变化曲线与散射系数的变化曲线形状相似, 大体呈

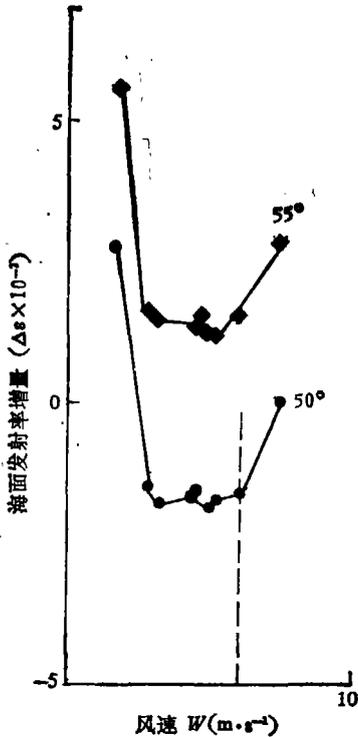


图 6 1983 年在渤海湾测得的海面 35.3GHz 微波垂直极化发射率随风速变化与满足布拉格散射条件的毛细波波谱超射出现位置的比较

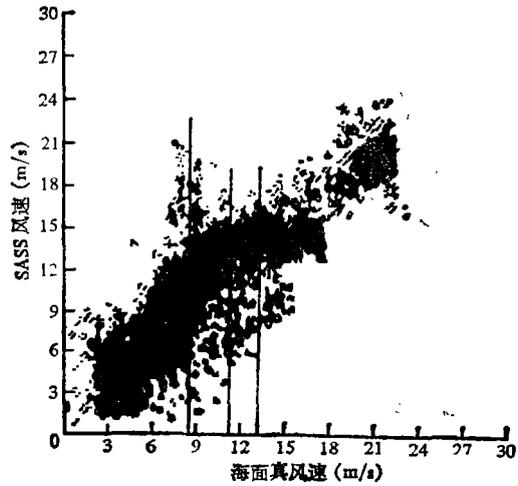


图 7 海洋卫星散射计所测风速与实测数据的比较。其中散射计风速明显高出实测值的位置与一、四、五阶布拉格散射波长波谱超射出现位置密切相关

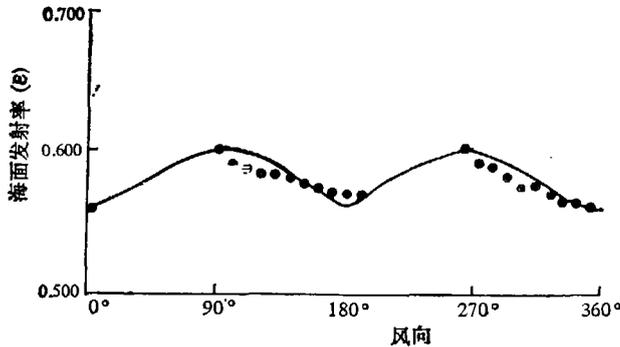


图 8 海面 3cm 微波发射率随风向的变化 (1984 年 9 月南黄海船载实测结果)

正弦形,但两曲线相位差约为 $\frac{\pi}{2}$,即前者极小值与后者极大值对应。这也进一步证明了两者的负相关关系。这条曲线的海洋学意义在于证明了海面毛细波的分布是有方向性的。

实测数据可以很好地用下列方程来拟合

$$\epsilon = 1 - \frac{1}{2} (0.835 + 0.010 \cos \phi + 0.035 \cos 2\phi),$$

式中 ϕ 为辐射计天线波瓣轴与风向夹角。这条拟合曲线已用细实线绘在图中。

五、讨 论

1. 本研究的主要发现为: 第一,海面毛细-重力波及其波谱的非线性特征对微波发射率有决定性影响。正是毛细-重力波斜率谱随风速发生的超射现象引起了发射率随风速变化的实测曲线出现下凹区。海面机械波动对电磁波动(微波)通过布拉格共振散射效应产生作用。利用这一理论计算了波长为 2.80, 1.55 和 0.85cm, 微波的海面共振散射波长, 以及这些共振波的波谱超射发生的风速。计算结果与微波发射率(或亮度温度)下凹区进行了对比, 二者完全吻合。第二,海面微波发射率随风向变化的现场实测结果表明,低海况时海面毛细波分布的方向性可以由微波辐射计反映出来。

2. 根据上述原理,设计多波长微波辐射计,有可能成为毛细-重力波波谱现场测量的实用仪器。测量数据将有助于人们对海-气间(通过风)进行能量与动量交换的微观过程加深认识。

3. 本研究的结果表明,海面粗糙度对微波辐射测量数据的影响不仅是不可忽略的,而且是可以预测的。因此,在利用微波辐射方法测量除风场以外的海洋物理量(如温度、盐度等)时,必须对海面粗糙度的影响进行校正,或者选择测量时机,避开海况的影响。

4. 本文提出的物理机制只适用于低海况情况,此时海面出现的只是毛细波和短波长重力波,在天线足印之内可以近似地认为海面起伏发生在一平均平面上,因此入射角近似不变。当海况变高时,物理机制将变得复杂,此时,长波长重力波将出现,仅就长波长重力波对短波长波产生调制作用而言,在天线足印之内,不能再认为毛细波出现在一平均平面上,所以入射角也不再是相对固定的。同时,波浪破碎产生的泡沫与飞沫都对微波辐射有重要贡献。毛细波波谱非线性特征的贡献必然被新的物理过程所掩盖,不再是支配性因子。实测结果也证明了这一点。

5. 布拉格散射效应对海面的水平极化微波辐射率也有影响,这种现象有待今后进一步测量与研究。

参 考 文 献

- [1] Nordberg, W., Conaway, J. and Thaddeus, P., Microwave observations of sea state from aircraft, *Quart. J. R.*, **95**(1969), 408—413.
- [2] HoUinger, J. P., Passive microwave measurements of the sea surface, *J. G. R.*, **75**(1970), 5209—5212.
- [3] Jr. Williams, G. I., Microwave radiometry of the ocean and the possibility of marine wind velocity determination from satellite observations, *ibid.*, **74**(1969), 4591—4594.
- [4] Pandey, P. C. and Kakar, R. K., An empirical microwave emissivity model for a foam-covered sea, *IEEE. J. O. E.*, **OE7**(1982), 135—140.
- [5] Stogryn, A., The apparent temperature of the sea state at microwave frequencies, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **AP15**(1976), 278—286.
- [6] 孙元福, 郑全安, 海洋学报, **3**(1981), 3: 400—409.
- [7] Long, S. R. and Huang, N. E., On the variation and growth of wave-slope spectra in the capillary-gravity range with increasing wind. *J. Fluid Mech.*, **77**(1976), 209—228.
- [8] Huang, N. E. et al., A new type of overshoot phenomenon in wind wave development and its implication in remote sensing of the ocean, (submitted to *J. G. R.*, 1983).
- [9] Hollinger, J. P., Passive microwave measurements of sea surface roughness, *IEEE, Trans on Geosci. Electro.*, **GE9**, 1971.
- [10] Ulany, F. T., Moore, R. K. and Fung, A. K., *Microwave Remote Sensing*, Vol. **II**, Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Massachusetts, 1982, 861—819.