

文章编号: 1001-3806(2004)05-0518-03

基于布里渊散射探测空间目标的计算分析

黄中华¹, 任刚¹, 蔡邦维¹, 张彬¹, 李丹²

(1. 四川大学 电子信息学院, 成都 610064; 2. 中国航天科技集团 7306 所, 成都 610100)

摘要: 提出用布里渊散射原理探测空间目标的方法。分别对大气、空间目标材料金属涂层及隐身材料的布里渊散射特性进行了计算和对比分析。结果表明, 大气布里渊散射频移与目标涂层及隐身材料布里渊散射频移之间相差至少大于一个数量级, 由此得出利用分析布里渊散射光谱来探测空间目标的可行性。计算了散射频移的大小, 并对探测技术作了分析, 采用一种窄带量子滤光系统探测装置, 对散射光谱进行了精确的探测和分辨。

关键词: 布里渊散射频移; 空间目标探测; 涂层; 量子滤光

中图分类号: O437.2 **文献标识码:** A

Calculation of detecting spatial object based on Brillouin scattering

HUANG Zhong-hua¹, REN Gang¹, CAI Bang-wei¹, ZHANG Bin¹, LI Dan²

(1. Department of Electronic Information, Sichuan University, Chengdu 610064, China; 2. 7306 Graduate School, Space-flight Science and Technology Group of China, Chengdu 610100, China)

Abstract: The paper gives a theoretical method of applying Brillouin scattering principle to detect spatial object. The properties of Brillouin scattering of atmosphere, metal coat of spatial object and concealed material are calculated, analyzed and compared. The result shows that the discrepancy of the frequency shifting of atmosphere, metal coat of spatial object and concealed material is at least more than 10 times, thus it is applicable to use Brillouin scattering to detect spatial objects. The article not only calculates the frequency shifting, but also studies the technique for detection, and adopts a technique of using narrow-band quantum optical filter system to distinguish the scattered light accurately.

Key words: Brillouin scattering frequency shift; spatial object detection; coat material; quantum filter

引 言

激光雷达在测距、大气遥感、环境监测、航天技术和目标跟踪等领域已展示出广阔的应用前景。常规激光雷达的原理是测量目标反射回波的振幅, 而作者讨论的布里渊散射激光探测雷达的原理是通过测量目标散射回波的频移来发现和跟踪目标的, 是一种基于调频的测量方法, 因而具有体积小、重量轻、高灵敏度、高信噪比和隐蔽性好等优点。近年来, 已有将其用于海洋盐份分布的遥测研究工作的报道。但是利用布里渊散射探测空间目标(如卫星、导弹、隐身飞机或航天器等)还未见报道。作者重点讨论空间金属铁、铝及其氧化物和隐身材料的布里渊散射频移; 计算后向散射(180°)分布在单位立体角内的强度, 建立了利用布里渊散射原理探测空间

目标的理论基础。基于探测的精度, 还给出了相应的探测方案。作者对该模型进行了反复的计算和对比分析, 结果表明, 根据大气和空间材料的散射频移差异, 采用相应的高分辨率、高灵敏度的光谱探测技术实现空间目标的探测是可行的。

1 大气和空间目标的布里渊散射特性对比

关于大气布里渊散射特性的研究, 已经建立了散射光频移的数学模型, 获得了大量的数据^[1], 在此不再赘述。本文中着重讨论空间目标的布里渊散射特性, 然后和大气进行对比分析。

布里渊散射光频移的公式如下:

$$\Delta \nu = 2 \nu_0 n (\nu / c_0) \sin(\theta/2) \quad (1)$$

式中, ν_0 为入射激光频率, n 为散射介质的实折射率, ν 为介质中的声速, c_0 为真空中的光速, θ 为散射角。对于不透明的金属材料, 介质的折射率 \tilde{n} 为复数, 它与材料的介电常数 ϵ 、磁导率 μ 和电导率 σ 有关, 如果入射光的频率为 ω , 则 \tilde{n} 可表示为:

$$\tilde{n}^2 = \epsilon \mu - i 4 \pi \sigma / \omega \quad (2)$$

作者简介: 黄中华(1979-), 男, 硕士研究生, 现主要从事激光光通信及非线性谐波转换技术的研究工作。

E-mail: fatalkill@sina.com

收稿日期: 2003-09-24; 收到修改稿日期: 2003-11-20

介质的实折射率表示为:

$$n = |\tilde{n}| = (n_r^2 + n_i^2)^{1/2} \quad (3)$$

对于背向散射, $\theta = \pi$, 所以金属的布里渊散射频移可以表示为: $\Delta\nu = 2\nu(n_r^2 + n_i^2)^{1/2}/\lambda$ (4)

式中, λ 为入射激光的波长。波长采用 $0.532\mu\text{m}$ 的激光, 是因为使用 LD 抽运 NdYVO₄ 的激光倍频可以方便地产生波长为 $0.532\mu\text{m}$ 的蓝绿光, 并具有很好的大气窗口特性。再根据 Fe 和 Al 的参数^[2], 可计算空间金属材料铁、涂层铝及其氧化物的布里渊散射频移, 结果见表 1。

Table 1 The refractive index, sound velocity and Brillouin scattering frequency shift of several kinds of metal

metal	$\lambda/\mu\text{m}$	n_r	n_i	$\nu/(\text{m s}^{-1})$	$\Delta\nu/\text{GHz}$
Fe	0.532	2.36	1.36	4800	49.15
Al	0.532	1.2	7.0	5820	155.39
Al ₂ O ₃	0.532	1.77	1.76	4000	37.54

空间目标材料中, 除铁、铝及其氧化物外, 还有一类特殊的材料就是隐身材料。隐身材料是隐身技术的重要内容, 隐身材料的主体是铁氧体。六角铁氧体是一类重要的雷达吸波材料。作者采用 $(\text{Zn}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{-W}$ 型六角晶系铁氧体为例, 分子式为 $\text{Ba}(\text{Zn}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ 。制备方法采用铁氧体工艺, 将质量分数为 80% 的铁氧体粉与质量分数为 20% 的环氧树脂粘合剂压制而成。根据 (2) 式~(4) 式, 入射激光波长为 $0.532\mu\text{m}$, 声速 $\nu = 4000\text{m/s}$, 电导率 $\sigma = 5000\Omega\cdot\text{m}$ 。计算结果见表 2。

Table 2 Brillouin scattering frequency shift of the $(\text{Zn}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{-W}$ ferrite

$\nu/^\circ\text{C}$	σ	μ	n_r	n_i	$\Delta\nu/\text{GHz}$
-25	$6.50 + i1.70$	$1.52 + i0.190$	3.1503	0.606133	48.24
0	$6.52 + i1.72$	$1.50 + i0.180$	3.13509	0.598644	48.00
25	$6.60 + i1.73$	$1.49 + i0.175$	3.14383	0.593655	48.11
50	$6.80 + i1.74$	$1.40 + i0.160$	3.09292	0.569688	47.29
75	$7.05 + i1.76$	$1.35 + i0.150$	3.09221	0.555186	47.24
100	$7.12 + i1.79$	$1.35 + i0.145$	3.1081	0.554825	47.48

数值计算结果显示, 在 50km 高空以下, 大气背景的布里渊散射频移随大气压、水气压和温度的变化并不明显, 频移量在 1 GHz~1.3 GHz 之间, 是个相对稳定的量^[1]。而由上面的计算得知, 在入射波长为 $0.532\mu\text{m}$ 时, 常温下空间金属和隐身材料的布里渊散射频移大于 35 GHz, 与大气背景的频移相差超过一个数量级, 图 1 和图 2 为频移曲线对比图。

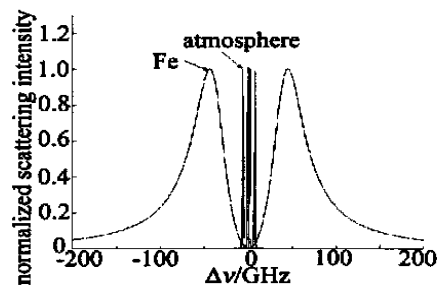


Fig. 1 Spectrum comparison of Fe & atmosphere

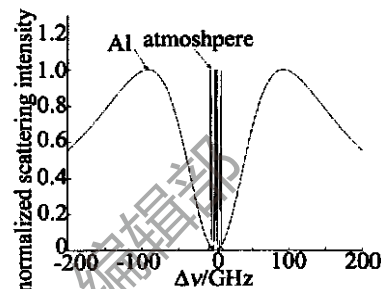


Fig. 2 Spectrum comparison of Al & atmosphere

上述差异表明, 使用高分辨率的滤波器, 将空间材料的布里渊散射光和大气背景的散射光分离, 再采用高灵敏度的光子计数法, 可达到探测空间目标的要求。要分离这两种光, 用一般的方法很难达到。为此, 设计了以下的选择方案。

2 布里渊散射光的探测方案

理论计算表明, 当探测光波长为 $0.532\mu\text{m}$ 时, 频率变化 $\Delta\nu \approx 30\text{GHz}$, $\Delta\lambda \approx 0.0281\text{nm}$ 。可见, 要精确测量布里渊散射频移, 必须采用超高分辨率和灵敏度光谱技术。因常规 F-P 系统不能达到分辨光谱的要求, 也不具有体积小、重量轻的优势, 所以不宜采用。窄带量子滤波器可用来解决这一问题, 目前美国已成功研制成实验样机, 并将它用于探测、跟踪和编目太空垃圾。探测布里渊散射频移的实验装置如图 3 所示。

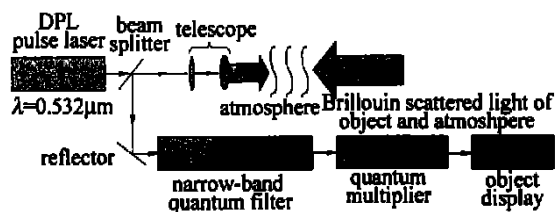


Fig. 3 Device for Brillouin scattering spectrum detection

由于窄带量子滤波器的分辨率为 $0.001\text{nm} \sim 0.002\text{nm}$ ^[3], 可以用来分辨 $\Delta\lambda \approx 0.0281\text{nm}$ 的布里渊散射光。但在三维的空间范围内的探测, 除了考虑分辨率对探测的影响之外, 还要考虑单位立体角

内的散射强度,然后对接收到的散射光进行放大。

在不透明材料中,由于高光学吸收,散射截面限制在垂直于样品表面,即后向散射。该效应可用波矢转换进行计算, $\mathbf{K} = \mathbf{K}_{in} - \mathbf{K}_s$, \mathbf{K} 是转换波矢也即声学波矢, \mathbf{K}_{in} , \mathbf{K}_s 分别是入、散射光的波矢。而 \mathbf{K} 在不透明材料中是复数,即 $\mathbf{K} = \mathbf{k}_r - i\mathbf{k}_i$ 。则散射矢 \mathbf{G} 中的积分 I_v 可写成如下形式^[41]:

$$I_v = \int_{u_{in}} \exp[-i(\mathbf{k}_r - i\mathbf{k}_i) \cdot \mathbf{r}] dV \quad (5)$$

式中, I_v 表示散射矢 \mathbf{G} 在整个散射体积中的积分, u_{in} 表示材料对入射波矢的应变, \mathbf{r} 为径向矢量, V 为材料表面附近的散射空间。式中的 \mathbf{k}_r 和 \mathbf{k}_i 分别是转换波矢 \mathbf{K} 的实、虚部。在简单的配置中,由于散射截面被限制在垂直于散射体的表面,所以 \mathbf{K} 垂直于表面,即 $\mathbf{K} = k \cdot \mathbf{z}$ 。因此,(5)式可写为:

$$I_v = \frac{i}{2} e_{in} q_z \delta_{q_x,0} \delta_{q_y,0} L_x L_y \times \int_0^\infty \exp[i(q_z - k_r) \cdot z - k_i \cdot z] \cdot dz = \frac{i}{2} e_{in} q_z L_x L_y \delta_{q_x,0} \delta_{q_y,0} \frac{1}{i(q_z - k_{z,r}) - k_{z,i}} \quad (6)$$

式中, e_{in} 表示入射光子位移量, $\delta_{q_x,0}$, $\delta_{q_y,0}$ 表示初始位置声子波矢的增量, L_x , L_y 分别表示散射截面的长和宽, q_z 表示声子在 z 方向的波矢分量。由此可得单位立体角散射功率为:

$$\frac{dP}{d\Omega} \approx \frac{1}{(q - k_r)^2 + k_i^2} \approx \frac{1}{(q/k_0 - 2n_i)^2 + (2n_i)^2} \quad (7)$$

式中, q 表示声子的波矢, k_0 表示声子波矢的最大值。对于背向光散射,当发射激光功率为1W时,散射中心频移处的最大立体角散射功率可表示为:

$$\left(\frac{dP}{d\Omega} \right)_{\max} = \frac{1}{4n_i^2} \quad (8)$$

上式表明,最大立体角散射功率只和材料对某波长的光的复折射率的虚部 n_i 有关。对材料进行数值模拟,当波长为 $0.532\mu\text{m}$ 的激光,Al和 Al_2O_3 的最大立体角散射功率分别为 0.012625W , 0.0807103W 。对于隐身目标,最大立体角散射功率为相应的隐身材料和金属涂层的乘积。对涂Al的隐身材料,最大立体角散射功率为 0.008954W ;对于涂 Al_2O_3 的隐身材料,最大立体角散射功率为 0.057241W 。而量子放大器的放大倍数为 10^4 倍~ 10^6 倍^[31],所以,能对接收到的光进行足够的放大,再采用高分辨率的滤光探测装置测量背向散射光从而达到探测空间目标的目的。

3 结论

不同构成成分的隐身材料,它们的介电常数和磁导率显然不同。通过模拟计算一些单质金属在大气背景下的布里渊散射光波,得出大气背景和目标的频移大小相差至少大于一个数量级。这种使用调频的探测方式比调幅的方式更准确,所需的功率更小,表明用 $0.532\mu\text{m}$ 的激光可以比微波更准确地探测空间目标。和应用微波探测空间目标相比,应用布里渊散射探测空间目标具有很多优点,比如精确度高、抗干扰能力强,以及体积小、重量轻、便于机载和星载等。所以,采用布里渊散射探测空间目标不但可行,还更精确、更方便。

参考文献

- [1] 王连亮,任刚,张彬 *et al.* 大气布里渊散射特性研究[J]. 激光技术,2003,27(4):365~367.
- [2] WEBER MJ. Optical materials [M]. Florida: CRC Press, 1986. 137,304.
- [3] 华欣生. 介绍一种“全天候”的激光雷达[A]. 第四届四川省光电技术学术交流会论文集[C]. 绵阳:中国工程物理研究院, 2002. 145.
- [4] CARDONA M, GUNTHERODT G. Light scattering in solids [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1982. 187.
- [24] KONDO K, NOUCHI K, MISTUYU T *et al.* Fabrication of long-period fiber gratings by focused irradiation of infrared femtosecond laser pulses [J]. Opt Lett, 1999, 24(10):646~648.
- [25] KA KARANTZAS G, BIRKSTA, RUSSEL PS. Structural long-period gratings in photonic crystal fibers [J]. Opt Lett, 2002, 27(12):1013~1015.

(上接第509页)

- [23] RAO YJ, WANG YP, RAN ZL *et al.* Novel fiber-optic sensors based on long-period fiber gratings written by high frequency CO₂ laser pulse [J]. J Lightwave Technol, 2003, 21(5):1320~1327.