水下目标信号特性及其有效衰减系数分析

杜竹峰[1],黄铁侠[2],卢益民[2],杨宗凯[2]
(1. 武汉邮电科学研究院系统部,湖北武汉 430074; 2. 华中科技大学电子与信息工程系,湖北武汉 430074)

摘 要: 本文采用一种改进的 Monte Carlo 方法对水下目标信号进行了模拟. 结果表明,除单次散射外,第二、三次散射对目标信号的作用最大. 而对水下目标时的有效衰减系数 K_{eff} 进行研究后发现, K_{eff} 与无水下目标的后向散射包络的有效衰减系数 K_b 是不相同的,即 $K_{eff} \neq K_b$. 并由不同参数条件下的模拟结果得出了它们之间的多个简单线性关系式.

关键词: 水下目标信号; Monte Carlo 方法; 多次散射; 有效衰减系数 K_{eff}; 接收机视场角 FOV
中图分类号: TN958 **文献标识码**: A **文章编号**: 0372-2112 (2003) 12-1815-05

Analysis of Underwater Target Signal and Its Effective Attenuation Coefficient

DU Zhu-feng[1], HUANG Tie-xia[2], LU Yi-min[2], YANG Zong-kai[2]
(1. *Wuhan Research Institute of Posts and Telecommunications, SD, Wuhan, Hubei* 430074, *China*;
2. *Dept of Electronics & Information, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan, Hubei* 430074, *China*)

Abstract: A modified Monte Carlo method is used to simulate the returned signals of underwater target. The results show that the contributions of the second and third scattering to the received target signal are very great in addition to the single scattering. Moreover, a new opinion that the effective attenuation coefficient of the target signal (K_{eff}) is larger than the attenuation coefficient of backscattering (K_b) is proposed. The simple linear relationships between K_{eff} and K_b are set up based on various parameters.

Key words: underwater target signal; Monte Carlo method; multiple scattering; effective attenuation coefficient; field of view of Lidar receiver

1 引言

海洋激光雷达是由装在飞机(或直升机)上的蓝绿激光发射设备和接收设备组成,垂直向水面发射大功率激光脉冲,以探测海洋中水下目标. 水下目标信号的有效衰减系数是海洋激光雷达接收信号中的一个主要参数,它决定了信号衰减的速度. C Funk、O Steinval 和 H Gordon 在研究后都认为[1~3]:有效衰减系数 K_{eff} 介于光束衰减系数 c 和漫射衰减系数 K 之间,即

$$K \leq K_{eff} \leq c \tag{1}$$

并且在清澈海水中, $c \leq 0.05\text{m}^{-1}$, K_{eff} 可以作为 c 的估计值;在浑浊的海岸水中, $c \geq 10\text{m}^{-1}$, K_{eff} 可以作为 K 的估计值.

而 B Wilson 等将有效衰减系数 K_{eff} 用吸收系数 a 和散射系数 b 表示[4]:

$$K_{eff}^2 = a^2 + 2ab$$

在纯吸收时 $K_{eff} = a$;在强散射时 $K_{eff}^2 = a/\zeta$,其中 ζ 是常数.

文献[5]中利用 Monte Carlo 模拟方法算得:

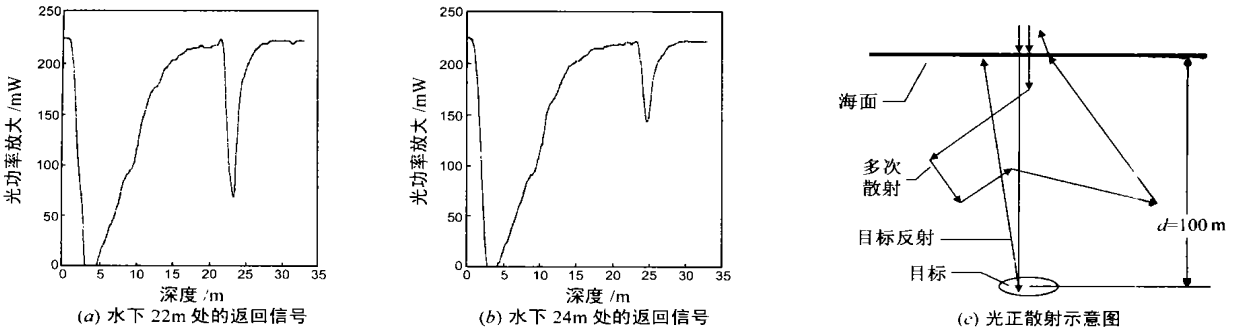
$$K_{eff} = c(1 - 0.832\omega_0) \tag{2}$$

式中, ω_0 是单次散射率. 在文献[5]中,当光子超出所设定的介质边界时,就停止此光子的模拟. 但实际情况中,始终存在着这样的可能性:光子在逸出锥体后,经过碰撞又返回锥体并最终到达接收机. 因此这种方法使得光子的多次散射幅度偏小,也即 K_{eff} 的值偏大. 在本文的 Monte Carlo 模拟中,综合考虑模拟结果和计算效率两个因素后,进行了如下改进:当光子逸出介质边界时,对此光子进行下一次跟踪. 如果在碰撞后光子返回边界以内,则继续此光子的模拟;如果光子还在边界以外,则终止此光子的模拟.

包括前面这些文献在内的观点都一致认为,无水下目标的后向散射包络的有效衰减系数 K_b 与有水下目标时的有效衰减系数 K_{eff} 是一致的,即 $K_{eff} = K_b$. 但在实验船池及南海进行的多次测试表明, K_{eff} 与 K_b 的结果并不相同. 目标返回信号的实验结果见图 1(a)、(b),根据实测得到的白板在水下 22m、24m 处返回信号数据,可计算出 $K_{eff} = 0.152\text{m}^{-1}$, $K_b = 0.13\text{m}^{-1}$. 尽管实验条件的制约可能造成测量误差,我们还是应该对此进行模拟研究. 本文模拟得到的结果表明, K_{eff} 与 K_b 确实存在着较大的差异. 后面我们对不同条件下的目标信号

收稿日期:2002-10-28;修回日期:2003-04-03
基金项目:国家自然科学基金(No. 69975006)

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



(a) 水下 22m 处的返回信号 (b) 水下 24m 处的返回信号 (c) 光正散射示意图

图 1 目标信号的实验测量结果及光子散射示意图

的有效衰减系数 K_{eff} 进行了计算.

如图 1(c) 所示光子散射示意图. 以往许多研究者的看法是,某点(如 100m 深处)的后向散射仅发生在此深度处. 但据此理论计算所得值比实验测得值要小得多. 实际上,目标反射比水体反射要大得多,而实验中发现,当目标深度较深时,目标处的后向散射往往比目标信号幅度大. 对此我们可以从光子运动的物理过程来解释:某点(如 100m 深度处)的后向散射不仅发生在此深度处,而且由于传输路径上发生后向散射的光子,会经过多次散射. 那些正好路径为 100m 而又被接收机收到的光子也对波形中 100m 处的信号幅度作了贡献. 由实验可知,后向散射的能量中大部分都是多次散射所提供的. 此处 100m 处的后向散射能量,既指路径上到达此点处的,又指时间上到达此点时的. 而接收到的目标信号几乎全是由目标的反射得到的.

2 目标信号特性分析

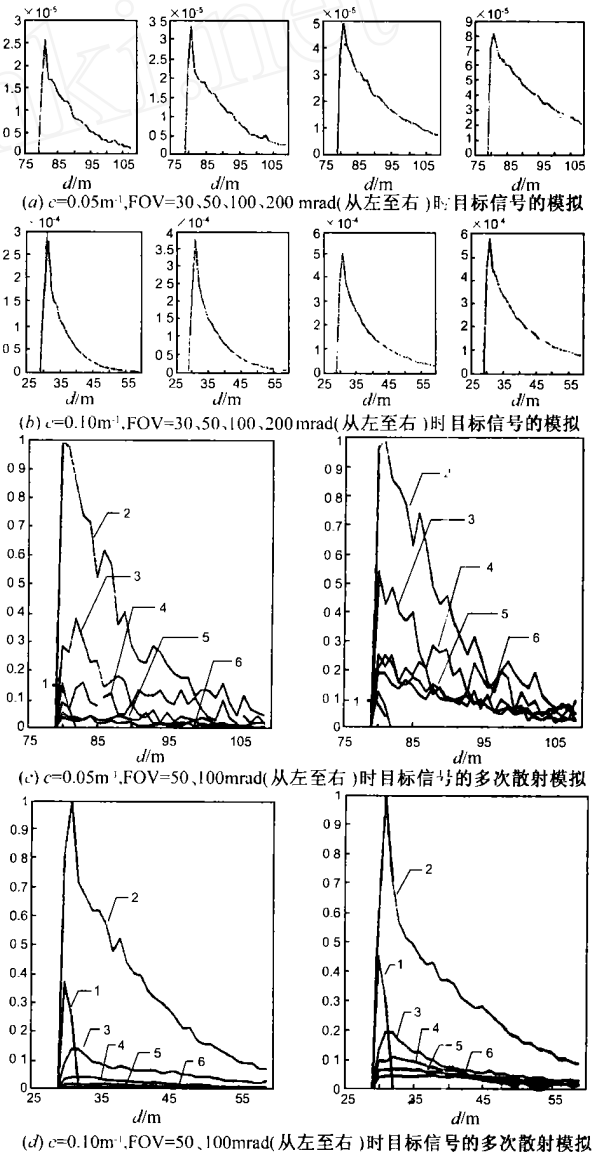
我们采用一种改进的 Monte Carlo 方法[6]进行目标信号的模拟. 从文献[6]中的结果可以看到,目标信号的上升沿较短较陡峭,而下降沿较长较平缓. 为此,我们单独对目标信号进行模拟. 为达到滤除后向散射的目的,在模拟中,我们对散射相位函数作如下处理:

$$\beta(\theta) = 0, \pi/2 < \theta < \pi$$

即仅保留光子在海水中的强前向散射,而将后向散射除去. 在水下目标处,认为目标平面为朗伯漫反射平面. 因此最后接收的信号就是目标信号.

模拟参数如下:光子数 $N = 2 \times 10^5$,光发射机与接收机离水面的高度为 $H = 500$m,接收光学天线面积 $A = 0.20\text{m}^2$,目标反射率 $\rho = 0.2$,单次散射率 $\omega_0 = 0.7$,海水衰减系数 $c = 0.05\text{m}^{-1}$,接收机视场角 FOV = 30、50、100 和 200mrad. 结果如图 2(a) 所示. 随着 FOV 的增大,目标信号幅度有所增大,并且其下降沿越来越平缓. 改变衰减系数 c 的值,令 $c = 0.10\text{m}^{-1}$,计算结果见图 2(b). 进一步增大 c,都能得到相同的结果.

我们认为,目标信号的这个特性是由于多次散射造成的. 因此,下面就对目标信号的散射次数进行模拟. 图 2(c) 是 $c = 0.05\text{m}^{-1}$、FOV = 50mrad 和 100mrad 时,目标信号的多次散射模拟结果. 显然,目标信号的第一次散射较弱,第二次散射最强,而目标信号的下降沿是由第二次以上的多次散射所得到的. 这说明在 80m 的水下目标处,单次散射已经很少,高次散射起主要作用. 对比图 2(c) 中不同 FOV 时的模拟结果,随着 FOV 的增大,第一次散射进一步减弱,第三次以上的高次散射明显加强. 综合而言,除单次散射外,第二、三次散射对目标信号的贡献最大.



(a) c=0.05m⁻¹,FOV=30、50、100、200 mrad(从左至右)时目标信号的模拟

(b) c=0.10m⁻¹,FOV=30、50、100、200 mrad(从左至右)时目标信号的模拟

(c) c=0.05m⁻¹,FOV=50、100mrad(从左至右)时目标信号的多次散射模拟

(d) c=0.10m⁻¹,FOV=50、100mrad(从左至右)时目标信号的多次散射模拟

图 2 目标信号的多次散射模拟

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

为进一步验证这个结论,我们进行了 $c = 0.10\mathrm{m}^{-1}$时的目标信号多次散射模拟. 图 2(d)是深度 $d = 30\mathrm{m}$ 的目标信号的多次散射模拟情况. 结果也较为一致. 从图中可以看到,单次散射的幅度很大. 显然,这是由于目标深度较浅造成的,此时光子经过一次散射之后返回接收机的概率大大增强.

模拟结果显示,二次散射对目标接收信号的贡献最大. 若单纯从碰撞次数来考虑,则随着光学深度 τ 的加大,高次散射的概率应该更大. 但在我们的计算中是将统计权值也一并进行了考虑(碰撞次数越多,权值越小). 因此就不难理解为何二次散射的接收幅度最大了.

3　目标信号有效衰减系数 K_{eff}的模拟

后向散射功率是一个时间的指数衰减函数,这个指数衰减的有效衰减系数取决于激光雷达系统的参数以及水质的光学特性.

接收机收到的信号单脉冲能量 E_s 可写为:

$$E_s = P_0 \Delta t_0 A T \frac{(1-\rho_w)^2}{\pi\left(\frac{d}{n_w}+H\right)^2}\rho \exp[-(2\beta_c H + 2K_{eff} d)] \cdot F$$

式中, P_0 是激光器发射的单脉冲激光功率; Δt_0 是发射脉冲宽度; Δt_0 是时间扩展后的接收脉冲宽度; A 是接收光学天线面积; T 是光学系统透射率; ρ_w 是海水反射系数; n_w 是海水折射率; ρ 是目标漫反射系数; d 是目标深度; H 是接收机高度; β_c 是大气衰减系数; K_{eff} 是有效衰减系数; F 是截获因子,定义为: F = 截获能量/光斑能量.

由上式可得:

$$K_{eff} = \frac{1}{2(z_2 - z_1)}\left[\ln\left(\frac{E_1}{E_2}\right) - \ln\left(\frac{(H+z_2/n_w)^2}{(H+z_1/n_w)^2}\right)\right] \tag{3}$$

式中, E_1、E_2 分别是深度为 z_1、z_2 时的信号单脉冲能量.

模拟参数设置如下: $N = 200000$, $H = 500\mathrm{m}$, $A = 0.20\mathrm{m}^2$, 目标反射率 $\rho = 0.2$, 单次散射率 $\omega_0 = 0.7$, 海水衰减系数 $c = 0.05$、0.1、0.15 和 $0.2\mathrm{m}^{-1}$.

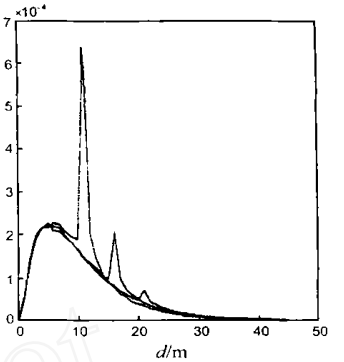


图 3　不同深度时的模拟曲线

图 3 是一个典型的模拟结果. 图中,将各个不同深度条件下得到的目标接收信号波形绘于同一个图中. 采用最小二乘拟合方法求出目标信号的有效衰减系数.

3.1　接收机视场角 FOV 对 K_{eff}的影响

在激光雷达中,随着接收机视场角的增大,目标信号和后向散射信号都明显增强. 因此 FOV 对 K_{eff}有很大的影响. 图 4(a)是 $c = 0.10\mathrm{m}^{-1}$, FOV = 10mrad、20mrad、30mrad、50mrad、100mrad、200mrad 和 π 时的模拟激光雷达接收信号波形. 目标是无穷大朗伯反射平面,目标深度 $d = 30\mathrm{m}$.

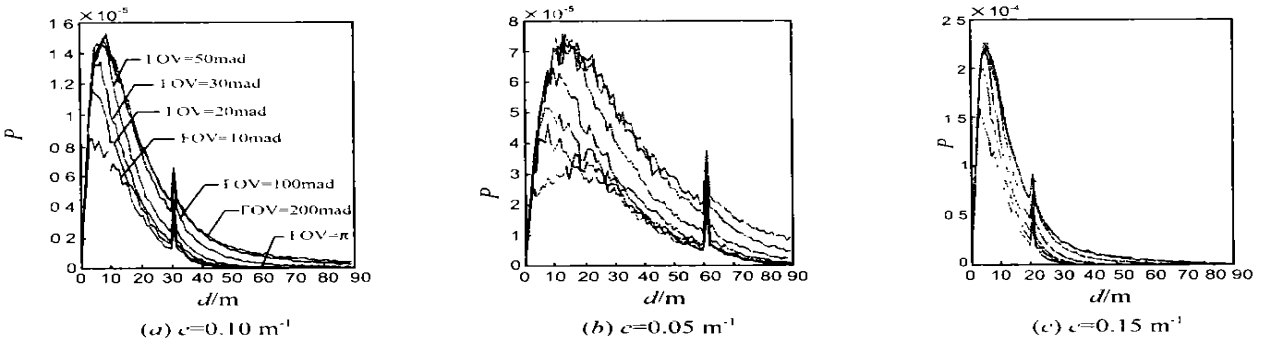


图 4　不同 FOV 的模拟激光雷达接收信号波形

从图中可以看出,当 FOV 增大时,后向散射幅度也随之增大,而目标信号没有什么变化. 这是由于目标为无穷大朗伯平面造成的. FOV 在 10～50mrad 之间时接收信号波形变化很大. 当 FOV > 100mrad 时,波形几乎没有任何变化.

为全面分析 FOV 的影响,我们对 $c = 0.05$、0.15 和 $0.20\mathrm{m}^{-1}$时的接收信号也进行了模拟. 如图 4(b)～(d)所示,信号波形具有与图 4(a)相似的特点.

为进行比较,我们选取几个典型接收机视场角 FOV = 20、50、100mrad. 当无水下目标信号时,后向散射曲线的有效衰减系数 K_b 与 c 的关系见图 5(a). FOV 太小,则不能截取从深水中返回的前向散射光. 这导致 K_b 比正常值偏大. 随着 FOV 的增大, K_b 逐渐减小. 当 FOV > 100mrad, K_b 就保持不变. 这可以从物理上解释:当 FOV 增大后,接收机收到的后向散射光子也随之增多,因此后向散射的衰减减缓. 当 FOV 增大到一定程度后,几乎能将后向散射光子全部接收. 此时 K_b 就不会随 FOV 增大而减小,而是维持恒定.

这与 H Kim 的结论[7]是一致的. H Kim 根据实验数据后认为,水的有效衰减系数 K_{eff}取决于接收机视场角 FOV.

当有水下目标信号时,目标信号的有效衰减系数 K_{eff}与 c 的关系见图 5(b). 其中目标为无穷大朗伯反射平面.

为对比 K_{eff}和 K_b,将图 5(a)、(b)中的 K_{eff}和 K_b 绘于图 5(c)中. 可以看出,尽管接收机视场角 FOV 不同,但 K_{eff}、K_b 近似为一线性关系. 通过线性拟合,得:

$$K_{eff} = 1.785 \cdot K_b \tag{4}$$

前面已提到,激光雷达离水面的高度 H 具有和接收机视场角 FOV 相似的作用. 模拟中,设 FOV = 100mrad,其余参数不变. 不同高度 H 时 K_{eff}、K_b 的计算结果见图 5(d)、(e). 从图中可以看出,随着 H 的升高, K_{eff}逐渐减小. 当 H 达到 500m 以

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

后，K_{eff}就趋于稳定值. K_b 随 H 的变化情况也说明了这一点.

不同 H 时的 K_{eff}、K_b 对应关系见图 5(f). 同样 K_{eff}、K_b 的线性拟合结果与式(4)一致.

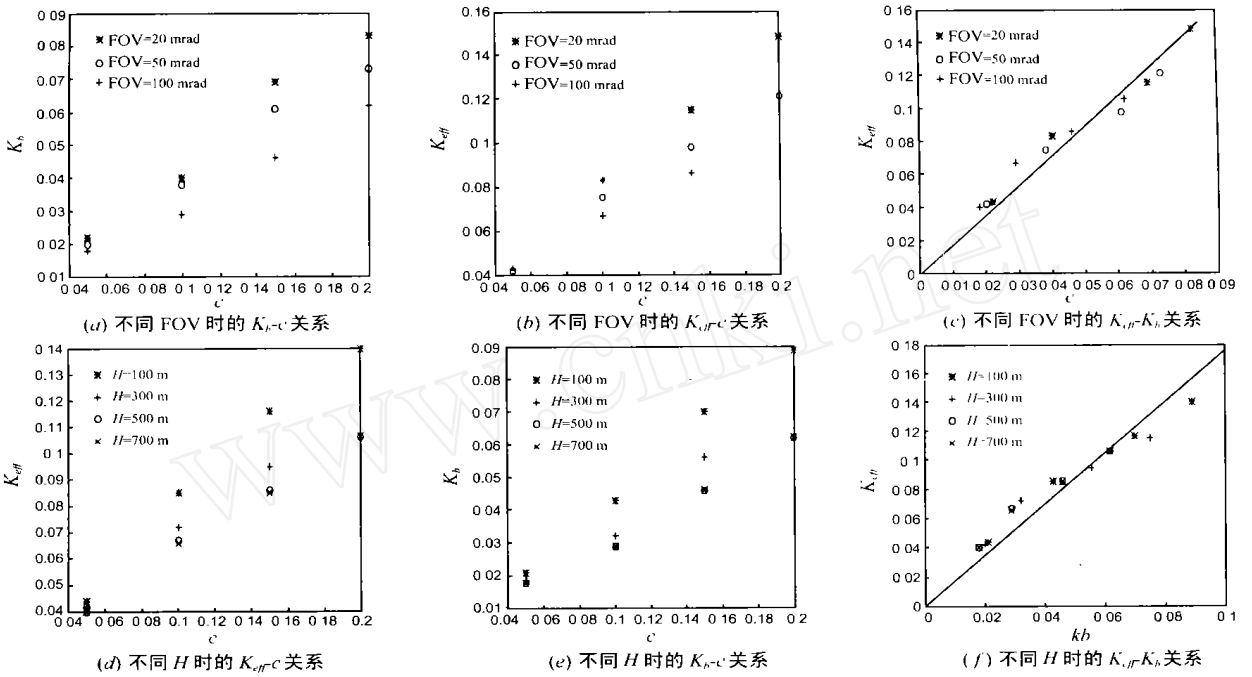
由上面的模拟可以得出如下结论：在目标信号的有效衰减系数 K_{eff}的求取中，接收机视场角 FOV 和激光雷达高度 H 具有相同的作用. 在其它参数给定的情况下，FOV = 100mrad、H = 500m 时就能得到 K_{eff}的稳定值. 而不管 FOV 和 H 怎么变化，K_{eff}和 K_b 都保持一种线性关系.

3.2 单次散射率 ω_0 与 K_{eff}的关系

式(2)建立了 K_{eff}与单次散射率 ω_0 的关系. 但式(2)得出的 K_{eff}的值偏大. 在此我们采用本文的 Monte Carlo 方法进行模拟，K_{eff}、K_b 的计算结果如图 6(a)、(b)所示.

从图中不难发现，K_{eff}和 K_b 都与 c 呈线性关系，而且 K_{eff}比 K_b 要大. 因此我们建立 K_{eff}/c、K_b/c 与 ω_0 的关系曲线，见图 6(c)、(d). 由图 6(d)的模拟结果，可得到下面的近似式：

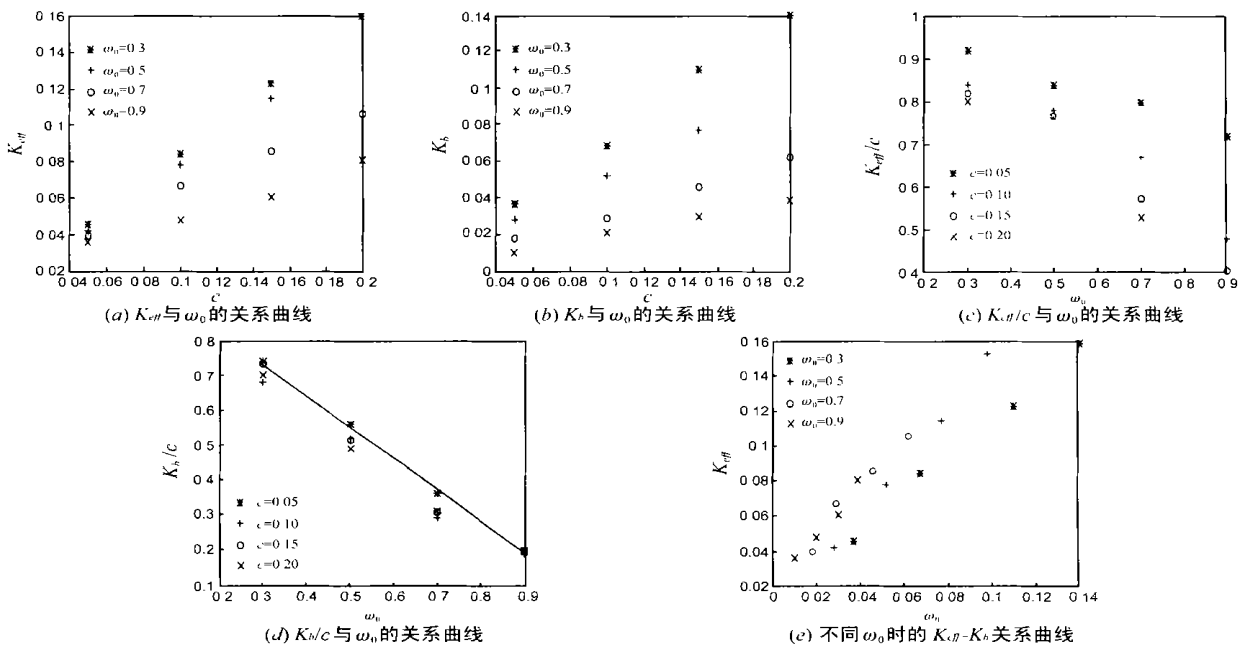
$$K_b/c = 1 - 0.898\omega_0 \tag{5}$$



(a) 不同 FOV 时的 K_b-c 关系　(b) 不同 FOV 时的 K_{eff}-c 关系　(c) 不同 FOV 时的 K_{eff}-K_b 关系

(d) 不同 H 时的 K_{eff}-c 关系　(e) 不同 H 时的 K_b-c 关系　(f) 不同 H 时的 K_{eff}-K_b 关系

图 5　不同参数时的 K_{eff}和 K_b 之间对应关系



(a) K_{eff}与 ω_0 的关系曲线　(b) K_b 与 ω_0 的关系曲线　(c) K_{eff}/c 与 ω_0 的关系曲线

(d) K_b/c 与 ω_0 的关系曲线　(e) 不同 ω_0 时的 K_{eff}-K_b 关系曲线

图 6　不同 ω_0 时的 K_{eff}和 K_b 之间对应关系

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

此式与式(2)中的系数存在着一定的差异.

图 6(c)的结果不是线性关系,这与我们的估计有所不同.通过分析,我们认为可能是目标反射特性与水中粒子的后向散射特性不同造成的.图 6(e)是对应的 K_{eff}、K_b 的值.结果表明,在不同的 ω_0 时,K_{eff}、K_b 近似为线性关系,尽管其斜率并不相同.

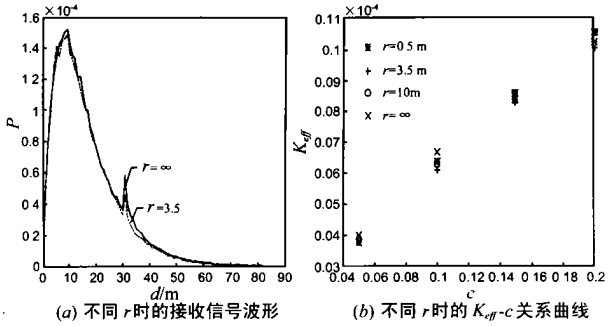
分析图 6(e)的四组曲线,K_{eff}、K_b 的斜率在 1.15～2.00 之间.在进行 K_{eff}的粗略估计时,可取为:

$$K_{eff} = 1.55\,K_b \tag{6}$$

3.3　目标半径 r 的影响

当目标半径不同时,接收机收到的目标信号幅度有很大的差别.图 7(a)是 $H = 500\text{m}$, $\omega_0 = 0.7$, FOV = 100mrad, $A = 0.20\text{m}^2$, $\rho = 0.2$, $c = 0.1\text{m}^{-1}$, $d = 30\text{m}$,而目标半径 r 分别为 3.5m 和∞时的接收信号波形.图中 $r = \infty$的目标信号幅度比 $r = 3.5\text{m}$ 时要大得多.虽然目标信号幅度也是一个需要研究的问题,但此处我们更关注的是它对目标信号的有效衰减系数 K_{eff}的影响.图 7(b)给出了上述参数条件下的不同目标半径 r 的 K_{eff} —c 关系曲线.

图 7(b)所得到的结果显示,在不同目标半径时 K_{eff}的值变化不大,即 r 对 K_{eff}影响很小.这表明,当 r 变化时,尽管目标信号幅度和背景噪声幅度都发生了很大变化,但 K_{eff}却保持很稳定的状态.因此,在无需其精确值的情况下,完全可以忽略目标半径 r 对 K_{eff}的影响.



(a) 不同 r 时的接收信号波形　　(b) 不同 r 时的 K_{eff}-c 关系曲线

图 7　不同目标半径 r 时的 K_{eff}的变化曲线

4　结论

通过上面的计算和分析,可以得到以下几个基本结论:

(1)目标信号的下降沿较长较平缓是由于多次散射产生的.随着 FOV 的增大,目标信号中单次散射已经较小,高次散射、特别是第二次散射起主要作用.除单次散射外,第二、三次散射对目标信号的贡献最大;

(2)提出了与目前的普遍看法不一致的观点,认为有水下目标时的有效衰减系数 K_{eff}与无水下目标的后向散射包络的有效衰减系数 K_b 是不相同的,即 $K_{eff} \neq K_b$.在不同参数条件下,目标信号的有效衰减系数 K_{eff}都比海水后向散射的衰减系数 K_b 要大.

(3)随着接收机视场角 FOV 的增大,K_{eff}和 K_b 逐渐减小.当 FOV 增大到一定值以后,它们就趋于稳定值.并且,K_{eff}与 K_b 存在一个线性关系:

$$K_{eff} = 1.785\,K_b$$

激光雷达高度 H 具有和 FOV 相同的作用;

(4)采用文献[6]的 Monte Carlo 方法建立了如下关系式:

$$K_b / c = 1 - 0.898\omega_0$$

而 K_{eff}与 ω_0 难于确立一种线性关系,但可以用下式对 K_{eff}进行粗略的估计:

$$K_{eff} = 0.55\,K_b$$

(5)尽管目标半径 r 使得接受信号幅度发生较大变化,但它对 K_{eff}影响很小,可以忽略这个因素的影响.

参考文献:

[1] O Steinvall et al. Laser depth sounding in the Baltic Sea[J]. Appl Opt, 1981, 20(19): 3284 - 3286.

[2] H R Gordon. Interpretation of airborne oceanic lidar: effects of multiple scattering[J]. Appl Opt, 1982, 21(16): 2996 - 3001.

[3] C J Funk. Multiple scattering calculations of light propagation in ocean water[J]. Appl Opt, 1973, 12(2): 301 - 313.

[4] B C Wilson, G Adam. A Monte Carlo model for the absorption and flux distributions of light in tissue[J]. Med Phys, 1983, 10(6): 824 - 830.

[5] 陈文革,等. 机载海洋激光雷达系统的有效衰减系数[J]. 电子学报, 1996, 24(6): 47 - 50.

[6] 杜竹峰,等. 海洋激光雷达接收信号的 Monte Carlo 计算[J]. 中国激光, 1999, 26(1): 52 - 56.

[7] H H Kim. Airborne bathymetric charting using pulsed blue-green lasers [J]. Appl Opt, 1977, 16(1): 46 - 56.

作者简介:

杜竹峰　男,1968 年 10 月生于湖北省武汉市,1998 年毕业于华中科技大学,获博士学位,现为武汉邮电科学研究院高级工程师,正从事国家"十·五"科技攻关项目高速光传输设备的开发工作.

黄铁侠　男,1933 年生于湖南省长沙市,华中科技大学教授,博士生导师,主要从事红外成像系统、激光水下目标探测系统及激光通信系统的研究.

卢益民　男,1945 年生于河南省,华中科技大学教授,博士生导师,主要从事图象处理、激光通信及水下目标探测系统的教学与研究.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net