

文章编号:1004-4213(2010)04-0693-6

水下平台对卫星上行激光通信研究*

刘金涛¹, 陈卫标²

(1 中国海洋大学电子工程系, 山东 青岛 266100)

(2 中国科学院上海精密机械研究所 先进激光技术与应用系统实验室, 上海 201800)

摘要:在合理选择通信系统参量和通信信道参量的基础上, 利用 Monte Carlo 方法模拟了卫星接收到的水下平台上行激光通信信号. 分析了卫星接收信号的空间和时间分布特性, 以及与望远镜接收视场角的关系, 并计算了接收信号的信噪比, 得出了 3° 望远镜视场角和 15 μs 信号积分时间的优化参量. 基于计算结果, 根据激光脉冲的 PPM 调制方式和最大似然检测方法, 计算了系统的通信误码率, 同时分析了海气界面、云等传输介质对通信的影响. 研究结果表明: 根据文中给定通信系统参量, 在典型海水、海气界面、云等环境条件下, 卫星与激光信号中心水平距离 5 km 范围内信号误码率 < 10⁻⁴. 因此位于水下 60 m 的水下平台可能实现对卫星上行激光通信.

关键词:激光通信; 水下目标; 卫星; Monte Carlo 模拟

中图分类号: TN929

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20103904.0693

0 引言

水下平台的上行通信一直没有解决. 这是因为: 首先, 海水对电磁波的强烈吸收阻碍了常规通信技术的应用; 其次, 海气界面的声阻抗不匹配使得声学技术也难以应用; 还有, 虽然海水对电磁波的长波和超长波吸收较弱, 但是长波和超长波设备的规模使得它们不可能被安装在水下平台上. 目前可行的是利用海水在蓝绿波段的光学窗口实现水下平台的上行通信. 随着现代激光器、超窄带光学滤波器和卫星技术的发展, 大能量蓝绿激光对卫星通信技术成为解决水下平台上行通信的一条有效途径.

当水下平台对卫星通信时, 向上垂直发射带有调制信息的激光脉冲. 发散角为 0° 的激光脉冲经过通信信道空间展宽, 在水下平台的垂直上方覆盖一定区域. 卫星经过该区域时, 在距离激光脉冲中心有限范围内, 接收信号的强度和信噪比足够大, 卫星能够成功接收激光脉冲信号, 经过解调后就可以获得通信信息.

水下平台对卫星上行通信的信道包括背景大气、云、海气界面、纯海水、海水中其他物质等. 考虑到多次散射, 激光脉冲在上述各个介质中明显的传输非线性使得运用理论方法对整体通信信道特性进行分析十分困难. 本论文中采用 Monte Carlo 方法

模拟了水下平台对卫星上行通信接收端的信号和信噪比特性, 并估计了通信误码率. 模拟中通信的发射和接收系统选用了合理的参量, 信道中各传输介质选用了典型参量.

1 模拟算法简介

本文在模拟时, 没有考虑到大气湍流的作用, 通信信道按照稳态对待, 因此采用了静态 Monte Carlo 方法^[1]. 为了增加模拟效率, 光子按照光子包处理. 根据通信实际情况, 设定光子包的初始空间位置坐标为水下平台的坐标 (0, 0, z), 其中 z 是水下平台的深度; 初始方位角 (在 xy 平面与 x 轴夹角) 按照等概率分布计算; 初始极角 (与 z 轴夹角) 为 -90° (垂直向上); 初始权重 ω = 1.

光子包在介质中传输, 传输距离 l 后与介质中的粒子发生碰撞, 即散射. 根据 Monte Carlo 算法的标准处理方法, 传输距离 l 由式 (1) 确定

$$l = -\ln(\text{rnd}) / (a + b) \quad (1)$$

式中, a 和 b 分别是介质吸收和散射系数, rnd 是 (0, 1) 之间均匀分布随机数.

此时, 光子包新的空间位置为

$$\begin{cases} x' = x + l \sin \beta \cos \alpha \\ y' = y + l \sin \beta \sin \alpha \\ z' = z + l \cos \beta \end{cases} \quad (2)$$

在散射中光子包要损失能量, 表示成损失的权重是

$$\Delta \omega = \omega \frac{a}{a + b} \quad (3)$$

这部分损失的能量是介质中粒子吸收的能量.

* 国家高技术研究与发展计划 (2006AA09Z148) 和国家自然科学基金 (40976060) 资助

Tel: 0532-66782992

Email: jtliu@ouc.edu.cn

收稿日期: 2009-06-11

修回日期: 2009-10-30

由于散射作用,光子包的传输方向会发生变化.散射方向与粒子的类型有关,如果是 Mie 散射,则按照 Mie 散射的相函数决定散射方向;如果是 Rayleigh 散射,则应遵照 Rayleigh 散射相函数.

当光子包传输到不连续的两种介质的界面时,根据 snell 定律界面反射率 R 表示为

$$R = \frac{1}{2} \left[\frac{\sin^2(\theta_i - \theta_t)}{\sin^2(\theta_i + \theta_t)} + \frac{\tan^2(\theta_i - \theta_t)}{\tan^2(\theta_i + \theta_t)} \right] \quad (4)$$

式中, θ_i 为入射角, θ_t 为折射角. 模拟时,产生一个随机数,当该数小于 R 时,光子包反射,否则折射.

光子包在介质中传输,它的权重 w 因为介质吸收不断的减少.当光子包的权重低于一定阈值时,它就应当被终止,然后进行新一轮光子包的计算,直到所有的光子包全部模拟完.但是直接丢弃原有光子包剩余权重会引起能量的不守恒,使算法有误差.解决的方法是给光子包一个 $1/m$ 的机会获得 $m \cdot w$ 的权重再进行传输.

2 模拟参量的选择

表 1 是 Monte Carlo 模拟时选用的发射系统、接收系统和信道中传输介质的主要参量.在蓝绿波段,根据目前激光波长与窄带光学滤波器的匹配情况,激光发射波长选在 532 nm,对应于 Nd:YAG

表 1 Monte Carlo 模拟时选用的相关参量

	Altitude of satellite orbit	500 km
	Background light intensity at atmosphere top	$3 \times 10^{-6} \text{ W} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$
	The background atmosphere height	0 ~ 50 km
Communication channel	Absorption coefficient of cirrus cloud	$0.000\ 258 \text{ km}^{-1}$
	Scattering coefficient of cirrus cloud	32.8 km^{-1}
	Wind velocity on ocean surface	10 ms^{-1}
	Absorption coefficient of ocean water	$0.072\ 4 \text{ m}^{-1}$
	Scattering coefficient of ocean water	0.34 m^{-1}
Transmission system	Laser wavelength	532 nm
	Laser energy	2 J
	Effective area of telescope	1 m^2
	Optical transmission of telescope	0.3
Receive system	Quantum efficiency of detector	0.2
	Bandpass width of DBF	0.19 nm
	Optical transmission of DBF	0.12
	Quantum efficiency of DBF	0.12
	Maximum field of view of DBF	60°

倍频激光器.虽然海水在 455 nm 附近有更高的光学透过率,但是该波长的大能量激光器技术还不成熟.

因为正午和晨昏时大气圈顶背景光的海面或云顶反射强度远远超出信号光强度,通信无法进行,所以本文模拟时考虑夜晚背景光情况.

模拟中考虑 0~50 km 的海洋上空背景大气,其中 5~50 km 取相对湿度 70% 的大陆型气溶胶,0~5 km 取相对湿度 90% 的海洋型气溶胶.此外,大气中还重点考虑云的影响.在海洋上空,出现概率和覆盖率最大的是层云、积云和卷云^[2].本文中首先模拟的是卷云的情况.根据统计规律,中低纬度海域卷云的平均厚度 500 m,云底高度 10 km.基于文献[3]公式,模拟时选择卷云的吸收系数和散射系数分别为 $0.000\ 258 \text{ km}^{-1}$ 和 32.8 km^{-1} .

除纯海水外,海水中其他物质主要考虑叶绿素和黄色物质,其中黄色物质的光学特性直接与叶绿素的浓度相关^[4].海水中叶绿素,以及与之相关的黄色物质的吸收系数和散射系数表示为

$$\begin{cases} a_{\text{chl}}(\lambda) = 0.06A(\lambda)[C]^{0.65} + a_y(440) \cdot \exp[-0.014(\lambda - 440)] \\ b_{\text{chl}}(\lambda) = 0.3 \frac{550}{\lambda} [C]^{0.62} \end{cases} \quad (5)$$

式中, a_{chl} 是吸收系数, b_{chl} 是散射系数, $a_y(440)$ 是波长在 440 nm 时黄色物质的吸收系数, C 是叶绿素含量 ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$), λ 是波长.模拟时首先考虑叶绿素含量 $1 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 的情况,对应海水的吸收系数和散射系数分别为 $0.072\ 4 \text{ m}^{-1}$ 和 0.34 m^{-1} .

卫星上光学接收系统中窄带光学滤波器选用了目前与 532 nm 匹配的特性最好的色散双折射滤波器(Dispersive Birefringent Filter, DBF).卫星轨道选择 500 km 的太阳同步轨道.通过对轨道参量的设计,使卫星夜晚经过水下平台上空,以满足通信对背景光的要求.

3 模拟参量的选择

根据表 1 参量,图 1 是当平台位于水下 60 m 深时,模拟得到的卫星接收的有效光电子数.图中数据为 $10 \mu\text{s}$ 内接收到的峰值信号.从图中可以看到:首先,接收有效光电子数的基本趋势是随卫星与激光信号中心水平间距的增大而迅速减小.这是因为模拟时假设水下平台上的激光垂直向上发射、激光的发散角为 0° ,而海水、云等传输介质的前向散射最强;其次,卫星接收到的有效光电子数与望远镜视场角有关,视场角越大,有效光电子数越多;但是当视场角增大到一定阈值时,有效光电子数基本保持不

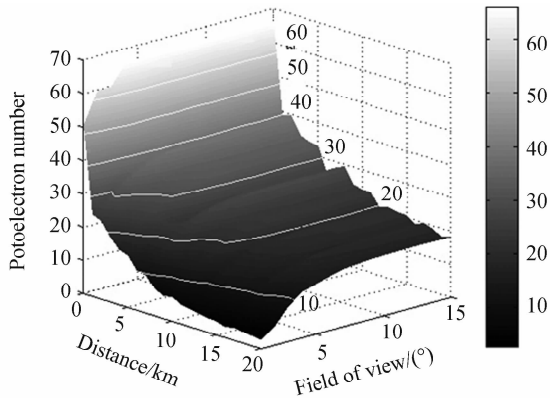


图1 卫星接收有效光电子数同望远镜视场角和卫星与激光信号中心水平距离的关系

Fig. 1 Received photoelectron number against telescope's field of view and horizontal distance from satellite to laser signal center

变;视场角的阈值随着卫星偏离信号中心距离的增大而增大。

图2是平台位于水下60 m,卫星与激光信号中心水平间距为5 km时接收到的有效光电子数,信号积分时间100 ns.从图中可以看到,5 km处的视场角阈值接近3°,并且随着接收时间的延长,阈值效应越明显,这与图2相符.时间上信号能量主要集中在15 μs以内。

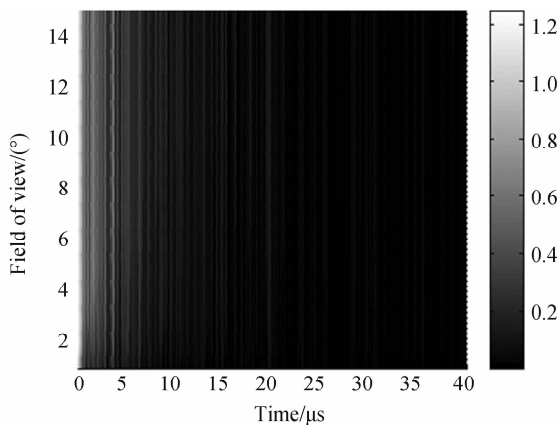


图2 卫星接收有效光子数与望远镜视场角和信号积分时间的关系

Fig. 2 Received photoelectron number against sample time slot and telescope's field of view

卫星接收信号的时间展宽特性和存在望远镜视场角阈值体现了通信系统整体光路对接收信号的限制,特别是多次散射的限制.传输方向与垂直方向偏离大的光子传输路径一般比较长,长的传输路径对应大的时间展宽.因为望远镜尺度相对于传输路径长度很小,所以只有传输方向与望远镜视场角阈值相匹配的光子才能被望远镜接收到.而与匹配方向稍微偏离的光子在空间上可能就与望远镜相距很远.如果光在传输过程中发生多次散射,那么它极可能偏离垂直传输方向,被望远镜接收到的可能性也

就很小.即使被接收到,它的传输路径也比较长,同时由于传输介质中的吸收,它的能量也较小。

4 信号的信噪比

由卫星接收到的有效光电子数,结合背景光强度,可以计算出接收信号的信噪比.图3是与图1数据相对应的信噪比。

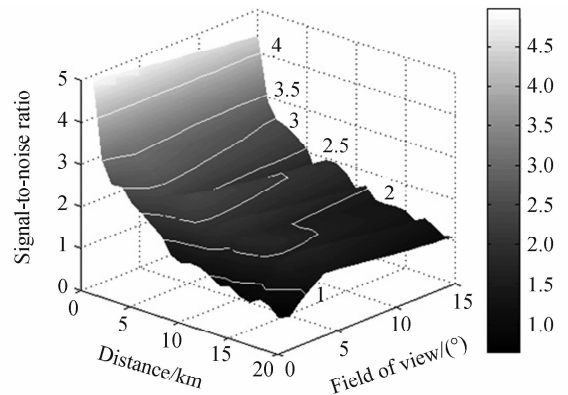


图3 卫星接收信号信噪比同望远镜视场角和卫星与激光信号中心水平距离的关系

Fig. 3 Signal-to-noise ratio against telescope's field of view and horizontal distance from satellite to laser signal center

从图3可以看出,因为卫星接收的背景光强度是一定的,所以信噪比的变化趋势与接收信号总体是一致的.在卫星与激光信号中心水平距离5 km处,望远镜视场角约3°时接收信号有最大信噪比。

因此,卫星上望远镜视场角设定在3°左右比较合适,一方面,卫星在水下平台垂直上方5 km区域内接收的信号强度和信噪比足够大;另一方面,该视场角的大口径望远镜是有可能实现的;同时,500 km高、3°视场角的望远镜海面覆盖区域半径约为25 km,卫星光学接收系统无须扫描和跟踪,这简化了卫星载荷。

5 通信误码率

水下平台对卫星的通信要采用大能量激光脉冲,与之对应的通信系统的调制一般采用M元脉冲位置调制(Pulse Position Modulation, PPM).在通信系统的接收端,可以采用最大似然检测进行解调.在无符号干扰和无时隙干扰的情况下,M元正交PPM平均符号差错概率可以表示为^[5]

$$P_e \leq (M-1) \exp \left[- \sum_{i=0}^{M-1} (\sqrt{K_s(i)} + \sqrt{K_b} - \sqrt{K_b})^2 \right] \quad (6)$$

式中,L为PPM调制每个时隙的采样数, K_s 是第i个采样点的信号光电子数, K_b 是背景光电子数。

根据PPM调制,如果采用512元PPM调制,

每个调制时隙的持续时间约为 $19 \mu\text{s}$. 由图 2 可以看出, 接收端信号超出 $15 \mu\text{s}$ 就很小了. 因此在这样的条件下, 卫星接收信号几乎不存在时隙干扰, 更不会存在符号间干扰. 式(6)中的 K_s . 由图 2 中的模拟结果给出, K_s . 根据表 1 中背景光的强度和接收系统参量计算出.

根据式(6)和前面的模拟结果, 可以计算出卫星接收信号的误码率. 图 4 是平台位于水下 60 m 处时, 卫星与激光信号中心水平距离 5 km 处接收信号的误码率. 图中信号的积分时间 100 ns , $L=10$. 从图中可以看到, 接收信号在望远镜视场角约 3° 时有最小的误码率, 这与图 3 一致. 此时, 信号误码率 $<10^{-4}$, 可以保证水下平台对卫星的有效通信. 同时, 因为卫星接收的信号能量主要集中在 $15 \mu\text{s}$ 以内, 所以超过 $15 \mu\text{s}$ 的接收信号对误码率的减小贡献很小. 因此, 在卫星接收端为了减小 PPM 解调运算量, 只需以 $15 \mu\text{s}$ 为窗口处理数据就可以获得较好的效果, 可以简化接收电子学和解调软件设计.

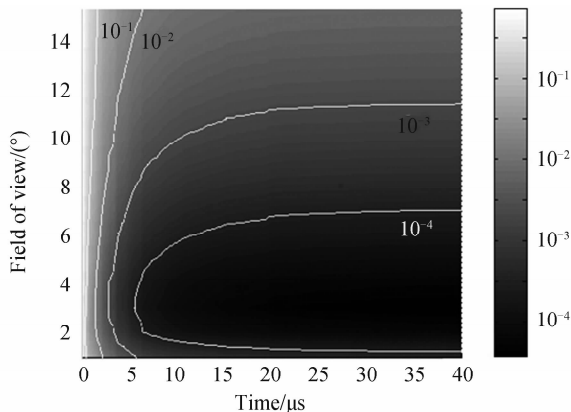


图 4 卫星接收信号误码率与望远镜视场角和信号积分时间的关系

Fig. 4 Error probability of received signal against sample time slot and telescope's field of view

6 传输介质对通信影响分析

6.1 海水中叶绿素的影响

根据文献[4], 大洋海水中叶绿素浓度超过 $1 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 的海域很少, 并且超出海域都比较靠近海岸. 因此文中模拟时采用的海水参量要比大多数海域严格. 为了进一步考察水质对通信效果的影响, 选择叶绿素含量 $0.15 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 进行分析, 对应海水的吸收系数和散射系数分别为 0.035 m^{-1} 和 0.099 m^{-1} , 比 III 类海水的参量略大.

结合表 1 的其他参量, 图 5 是模拟得到的误码率信号同信号积分时间和卫星与激光信号中心水平距离的关系, 此时平台位于水下 140 m、望远镜视场角固定在 3° . 从图中可以看到, 在卫星与激光信号中心水平距离 5 km 处误码率仍小于 $<10^{-4}$. 因此

当海水中叶绿素含量越小, 在相同通信效果下, 水下平台的深度可以更深. 这说明水质对通信效果的影响是很大的.

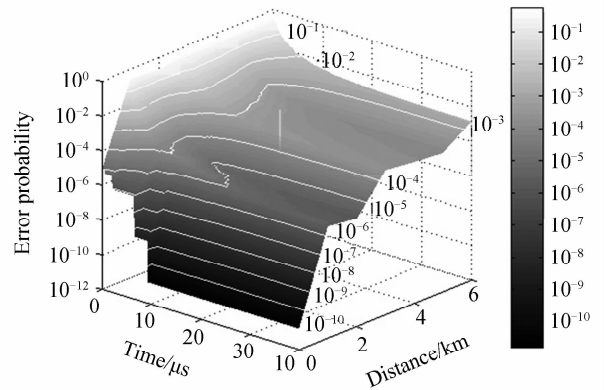


图 5 卫星接收信号误码率同信号积分时间和卫星与激光信号中心水平距离的关系

Fig. 5 Error probability of received signal against sample time slot and horizontal distance from satellite to laser signal center

6.2 海气界面的影响

海气界面影响主要有两方面因素, 一是海浪, 二是海面泡沫. 海浪和海面泡沫都与海面风场有关. 海浪使海面法线方向发生改变, 从而影响激光的反射和折射. 海面法线方向与垂直方向夹角为 θ 的概率是^[6]

$$P(\theta) = \frac{2}{\sigma^2} \exp\left(\frac{-\tan^2 \theta}{\sigma^2}\right) \tan \theta \sec^2 \theta \quad (7)$$

式中 $\sigma = (0.003 + 0.00512V)^{1/2}$, V 是海面风速 (m/s). 根据式(7)当海面风速小于 10 m/s 时海面法线方向变化不是很大, 对激光传输的影响较小.

海面泡沫的最大覆盖面积与风速 V 的关系为^[7]

$$\begin{cases} C_f = (1.2 \times 10^{-5})V^{3.3} & V < 9 \text{ m/s} \\ C_f = (1.2 \times 10^{-5})V^{3.3} [0.225V - 0.99] & V \geq 9 \text{ m/s} \end{cases} \quad (8)$$

当海面风速 $V=10 \text{ m/s}$ 时, 泡沫的最大覆盖面积为 3%, 对激光传输影响不大; 当海面风速 $V=15 \text{ m/s}$ 时, 泡沫的最大覆盖面积约为 22%, 影响十分严重.

若考虑一般环境条件, 取海面风速为 10 m/s, 则海面泡沫的作用可以忽略.

6.3 云的影响

图 6 是层云条件下模拟的误码率同信号积分时间和卫星与激光信号中心水平距离的关系, 水下平台位于水下 80 m、望远镜视场角固定在 3° . 除云的参量外, 其他参量与表 1 一致. 基于层云的统计规律, 模拟中选取层云云底高度 2 km, 厚度是 275 m. 根据文献[8], 选取层云吸收系数和散射系数分别为

0.000169 km^{-1} 和 62.35 km^{-1} 。虽然模拟中层云的光学厚度与卷云的基本一致,但从图 6 可以看到,通信误码率要比卷云下小得多,即层云对激光信号的影响要小与卷云。

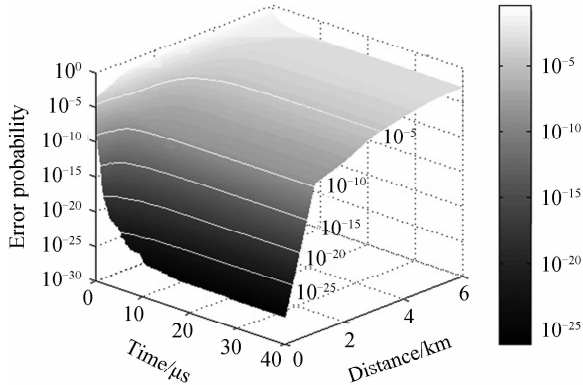


图 6 卫星接收信号误码率同信号积分时间和卫星与激光信号中心水平距离的关系

Fig. 6 Error probability of received signal against sample time slot and horizontal distance from satellite to laser signal center

卷云是典型的冰云,而层云是典型的水云,层云的散射系数大约是卷云的两倍,而卷云比层云的吸收系数略大。卷云和层云对通信影响的差异主要基于以下原因:首先,虽然层云的散射系数大约是卷云的两倍,然而系统整体光路的限制使得云多次散射对接收信号的贡献不明显,因此散射系数的影响就不明显;其次,卷云比层云的吸收系数略大,激光信号能量在卷云中损失比较多;还有,根据文献[3]和[8],卷云的后向散射比层云的强,卫星接收到的背景光能量在卷云时比较多。

图 7 是卷云和层云条件下接收的背景光电子数,接收信号积分时间为 100 ns,其他条件同表 1。

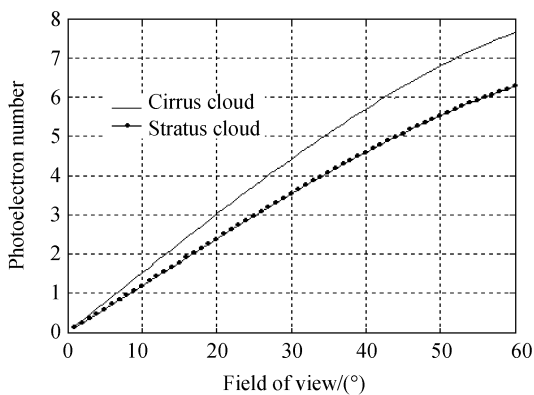


图 7 层云和卷云条件下卫星接收的背景光电子数
Fig. 7 Received background photoelectron in cirrus and stratus conditions

从图中看到,层云条件下背景光产生的有效光电子数大约是层云条件下的 1.2 倍,与望远镜视场角无关。虽然两者在绝对数量上相差不多,但是由于信号有效光电子数也不多,根据式 2 层云下的通信效果要好于卷云。

积云是水云或冰水混合云,由文献[9]通常情况下它的吸收系数和散射系数都小于其他两种云。因此可以推断积云对激光脉冲传输的影响较卷云和层云小。

7 结论

基于 Monte Carlo 模拟的结果,根据对信号接收强度、信噪比和通信误码率的计算,以及海气界面、云等传输介质影响的分析,当通信系统符合表 1 的参量时,位于水下 60 m 的水下平台可能实现对卫星上行激光通信。

参考文献

- [1] LERNER R M, SUMMERS J D. Monte Carlo description of time- and space-resolved multiple forward scatter in natural water[J]. *Appl Opt*, 1982, **21**(5): 861-869.
- [2] HOBBS P V. *Aerosol-cloud-climate interactions* [M]. Academic Press, San Diego, 1993. 97-121.
- [3] KEY J R, YANG Ping, BAUM B A, et al.. Parameterization of shortwave ice cloud optical properties for various particle habits[J]. *J of Geo Res*, 2002, **107**(D13): 4181-4190.
- [4] LOISEL H, MOREL A. Light scattering and chlorophyll concentration in case 1 waters: A reexamination[J]. *Limnol Oceanogr*, 1998, **43**(5): 847-858.
- [5] ZHOU Chuan-yun, HUANG Xiang-fu, AO Fa-liang, et al.. Optimum detection for optical PPM sampled signal [J]. *J of UEST of China*, 1999, **28**(3): 247-250.
邹传云, 黄香馥, 敖发良, 等. 光 PPM 取样信号的最大似然估计[J]. *电子科技大学学报*, 1999, **28**(3): 247-250.
- [6] COX C, MUNK W. Measurement of the roughness of the sea surface from photographs of the Sun's glitter[J]. *JOSA*, 1954, **44**(11): 838-850.
- [7] GORDON H R, JACOBS M M. Albedo of the ocean-atmosphere system; influence of sea foam [J]. *Appl Opt*, 1977, **16**(8): 2257-2260.
- [8] HU Y X, STAMNES K. An Accurate parameterization of the radiative properties of water clouds suitable for use in climate models[J]. *J Climate*, 1993, **6**(4): 728-742.
- [9] LIU Jin-tao, CHEN Wei-biao. Feasibility study of laser communications from a satellite to a submerged platform[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(11): 1441-1446.
刘金涛, 陈卫标. 星载激光对水下平台通信可行性研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(11): 1441-1446.

Uplink Laser Communications Between a Satellite and a Submerged Platform

LIU Jin-tao¹, CHEN Wei-biao²

(1 *Department of Electronic Engineering, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China*)

(2 *Advanced Laser Technique & Applied System Laboratory, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China*)

Abstract: The uplink laser communication signal from a submerged platform to a satellite is simulated using Monte Carlo method with certain communication system parameters and reasonable channel parameters. The temporal and spatial distributions of received signal and the relations between signal and telescope's field of view are analyzed. The signal to noise ratio of the receiver is calculated, which educes the optimized field of view of 3° and sample time slot of $15 \mu\text{s}$. Then the error probability of the communication system is computed for laser pulse position modulation (PPM) and maximum likelihood detection. The results show that the error probability is below 10^{-4} when horizontal distance from satellite to laser signal center is less than 5 km. Consequently, the uplink laser communication between a submerged platform at 60 m depth and a satellite can be achieved under slightly severe environment.

Key words: Laser communications; Submerged platform; Satellite; Monte Carlo simulation

LIU Jin-tao was born in 1972, and received the Ph. D. degree from Ocean University of China in 2001. His research interests focus on lidar and laser remote sensing.

