

蓝绿激光对潜通信光信道的研究

Light Channels of Blue-Green Laser Communication to Submarine

何宁 陈名松 敖发良 张德琨
He Ning Chen Mingsong Ao Faliang Zhang Dekun

(桂林电子工业学院二系 桂林市金鸡路1号 541004)

(Dept. 2, Guilin Institute of Electronic Technology, 1 Jinjilu, Guilin, Guangxi, 541004, China)

摘要 在蓝绿激光对潜通信系统中,不同传输信道对通信能力和通信距离都有不同程度的影响,根据这个特点,分析传输信道特性和背景辐射,理论计算与实地实验表明:系统在I类海区实现100 m以上深度的通信是可能的;通信深度与单脉冲能量 E_p 成非线性关系,在通信距离不大时通信深度随 E_p 增大而增大,当通信深度达某一深度时,通信距离不再随 E_p 的增大而增大。

关键词 对潜通信 背景辐射 信道衰减

中图法分类号 TN 929.1

Abstract In the blue-green communication system to submarine, there are different influences to communication capability and communication distance in different transmitting channels. The transmitting characteristic and background radiation are analyzed. The following results are obtained from calculation and field trial. In the class I sea area, the communication within 100 m depth layer is possible in this system. There is a nonlinear relationship between communication depth (Z) and single pulse energy (E_p). The communication distance increases along with E_p increasing when Z is small; and not increase with E_p increasing when Z gets to some value.

Key words communication to submarine, background radiation, channel attenuation

衡量对潜通信方式优劣的基本标准是“隐蔽、有效”。隐蔽是指潜艇在下潜状态时能完成通信任务;有效则要求信息传送速度快、可靠性高。蓝绿激光对潜通信(SLC)是利用海水对蓝绿激光(450 nm~550 nm)的低损耗窗口,实现飞机(或卫星)对水下约300 m深度的潜艇通信。这种通信方式具有波束隐蔽、接收天线小、通信速率高、抗干扰和保密性强等优点,它可能成为水下通信的一种最有效方式。

激光对潜通信系统由光发射机、光接收机及信号检测与处理系统、其它辅助系统等组成,可分为陆基、天基、空基3种。空基系统容易实现,相应技术可以延伸扩展,在技术条件成熟的情况下,这套方案易升级为陆基和天基系统。空基系统是将大功率激光器置于飞机上,让飞机到指定的海域上空完成对潜通信的

功能,飞机以广播通信方式,在指定海域上空的一定高度以一定速度扫过海域,在水下产生十几平方公里的光斑,并将信息连续地传输多次从而保证潜艇能可靠地接收。目前,空基系统成为国内外的主要研究目标。

激光对潜通信的光信道由大气、空气/海水界面和海水三部分组成,光在这些信道中由于散射和吸收会发生很大的衰减,使到达接收机的信号很弱。因此有必要对不同信道的特点进行详细的分析,以便为系统设计提供重要依据。

1 信道分析

由于SLC信道的复杂性,有人称它为至今人类最复杂的通信研究项目,它是电子技术、激光技术、通信技术、航天技术等技术的综合,同时还涉及海洋学、气象学等领域。下面对各种信道进行具体分析。

1.1 大气信道

大气信道是由云、雾和雨所组成，大气衰减主要是气溶胶粒子的 Mie 散射引起的^[1]，而分子的 Reyleigh 散射和吸收则可忽略不计。在海上，云的衰减比雾大得多，故计算时均按云来考虑，并认为云的消光系数近似等于散射系数，当波长在 450 nm~ 550 nm 范围时，各种云层消光系数 U_c 如表 1

表 1 云层的消光系数

Table 1 Extinction coefficient of cloud layers

云型 Cloud type	U_c / m^{-1}	云型 Cloud type	U_c / m^{-1}
雨层云 Rain cloud layer	0.128	层云 I Cloud layer I	0.067
高层云 High cloud layer	0.108	积雨云 Cumulonimbus	0.044
层云 II Cloud layer II	0.100	层积云 Cumulostratus	0.045
浓积云 Cumulus congestus	0.069	晴天积云 Cumulus	0.021

云层的光谱辐照度透射率 L_c 可按式计算^[2]：

$$L_c = \begin{cases} \frac{F \times 1.69}{f(1 - \langle \cos \theta \rangle) + 1.42}, & (f \geq 10), \\ F(1 - 0.046f), & (f < 10), \end{cases} \quad (1)$$

式中 L_c 为有云和无云时海面辐照度比值； f 为云层光学厚度， f 与云层物理厚度 D 的关系为 $f = U_c D$ ； $\langle \cos \theta \rangle$ 为散射角的平均余弦值，对于可见光， θ 取 34° ；系数 F 为与云层上面的光线入射角有关的函数。

1.2 海水界面的影响

海深不同，海底浪涌和海面的浪高也不一样，由于海水的镜面反射和白浪反射，会对信号产生衰减。光由空气进入海面时，能量的界面透射率为

$$L_{aw} = L_{aw1} L_{aw2},$$

式中 L_{aw1} 是由折射率不连续性决定的界面透射率； L_{aw2} 是由海水泡沫及条纹决定的界面透射率。当 $f \geq 10$ 时，界面的入射是漫射光，海面风速 $g < 8 \text{ m/s}$ 时，取 $L_{aw} \approx 0.83$

1.3 海水信道

在海水中，由于本身的散射和海水中悬浮粒子引起的散射，而悬浮粒子的尺寸分布随水质不同差异很大，海水中粒子的散射要比大气的散射强 2 到 3 个数量级^[3]，下面对光在海水中的透射情况进行分析。

a. 向下辐照度的透射率 主要考虑有云天空的情况，这时入射到海水里的是云的漫射光。对于漫射光，海水的衰减遵从指数规律，其透射率为：

$$L_w = \exp(-K_d Z), \quad (2)$$

式中 K_d 为向下漫射衰减系数 (m^{-1})，其取值决定于水质，并与深度有关，表 2 给出部分数值。Z 为深

度 (m)

表 2 向下漫射衰减系数 $K_d (m^{-1})$

Table 2 Attenuation coefficient $k_d (m^{-1})$ of downwards diffusion

I 类海区 Sea zone I	II 类海区 Sea zone II	III 类海区 Sea zone III
0.032	0.063	0.120

一般说来，随着深度增大， K_d 值会有所减小，若将深度分为 j 层则 (2) 式改写为：

$$L_w = \exp\left(-\sum_{i=1}^j K_{di} Z_i\right). \quad (3)$$

b. 水下辐射率分布 指向水中任一点的辐射率 N 是天顶角 θ 和方位角及深度 Z 的函数，即 $N = (O, \theta, Z)$ 。图 1 是代表远海海水和近海海水的达到渐进状态的归一化的辐射分布曲线。图中只画出了 θ 为 $0^\circ \sim 100^\circ$ 的部分。

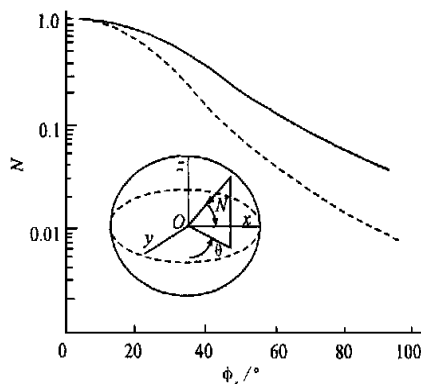


图 1 归一化的辐射分布曲线

Fig. 1 Normalized radiation curve

— 近海 Offing sea; - - 远海 Open sea; xoz 为太阳平面 xoz is sun plane; θ : $0 \sim \pi$.

在计算接收光功率时必须乘上一个与辐射率分布和视场角有关的因子 $f(\theta)$ ，有了图 1 曲线后，与视场角有关的因子可用数值积分法求出：

$$f(\theta) = \int_0^{2c} d\theta \int_0^{\theta} N(O, \theta) \cos \theta \sin \theta d\theta \int_0^{2c} d\theta \int_0^{\theta} N(O, \theta) \cos \theta \sin \theta d\theta, \quad (4)$$

式中 θ 为视场角。计算结果见图 2，从图中可看出，当

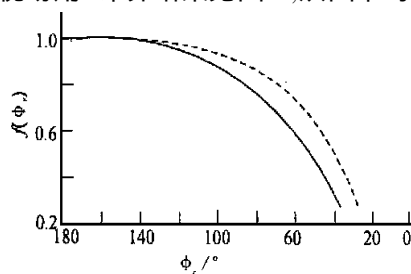


图 2 $F(\theta)$ 与 θ 的关系

Fig. 2 Relation between $F(\theta)$ and θ

— 近海 Offing sea; - - 远海 Open sea.

$Q > 90^\circ$ 时, $f(Q)$ 数值增加不多, 故视场角不必过大; 使用原子滤光器时, 视场角可取 90° 。

2 背景辐射

潜艇接收机除接收信号能量外, 同时还会接收来自天空的自然光, 以及海洋生物所产生的背景光辐射干扰, 这种干扰以噪声形式出现, 它降低了信噪比, 增大了系统的误码率。在白天, 主要的背景辐射源是太阳和天光, 在夜晚则为月光、星光、生物光及黄道光等, 若太阳、月亮处于接收机的视场内, 则可把它们看作点源处理; 对于天光和云层, 则可看成是充满视场的扩展源。由于自然光的辐照是非相干的, 经云层多重散射后, 入射到海面的背景光为漫射光, 再经海水吸收、散射后到达接收机, 此时背景光的光场分布与信号的光场分布相同。

在无云晴天, 海面辐照度除阳光直射外, 天光的贡献不能忽略, 可近似认为天光在海面的辐照度是太阳的 0.2 倍; 在夜晚, 只考虑月亮的光谱辐照度, 忽略星光、黄道光等的影响; 海洋中的生物光, 其辐射强度偶尔可达到相当于深度为 220 m 左右的阳光辐射, 但它的不确定性太大, 目前缺乏完整的统计资料, 因此暂时不予考虑。通过上面的讨论, 可给出背景光功率的计算公式^[4]。

$$P_b = H\Delta\lambda ATL_cL_wL_{aw}f(Q), \quad (5)$$

式中 A 为接收天线面积 (m^2); T 为接收光学系统和滤光器的总透过率; $\Delta\lambda$ 为滤波器的带宽 (nm); P_b 的单位是 W 。

3 信道衰减计算

通过对激光对潜通信光信道的分析后, 此时我们最关心的是接收到的信号功率, 假设蓝绿激光器输出的单脉冲能量是 E_p , 水下潜艇接收到的光脉冲能量 E_r 可表示

$$E_r = E_p(A/S)VL_cL_{aw}L_wTf(Q), \quad (6)$$

式中 A 为接收光学天线的面积; S 为接收处水下光斑面积; L_a 为大气分子散射的透射率; V 为发射机光学系统的透射率; T 为接收机光学系统与滤光器的透射率。

为了说明数值关系, 把各项因素产生的能量衰减用 dB 表示则式 (6) 变为

$$10 \lg(E_r/E_p) = 10 \lg(A/S) + 10 \lg V + 10 \lg L_a + 10 \lg L_c + 10 \lg L_{aw} + 10 \lg L_w + 10 \lg T + 10 \lg f(Q).$$

理想情况下各项衰减范围如下: $10 \lg(A/S)$ 为面积比衰减, 取 -86.8 dB ; $10 \lg L_a$ 为大气衰减, 取 -1.3 dB ; $10 \lg L_c$ 为云层衰减, 取 $-2.7 \text{ dB} \sim -10.4 \text{ dB}$; $10 \lg L_{aw}$ 为空气-海水界面衰减, 在阴天, 风速 g

$< 8 \text{ m/s}$ 时, 值为 -0.8 dB ; $10 \lg L_w$ 为海水衰减, 在阴天, 深度为 150 m , 波长为 532 nm 时, 对 I 类海区衰减为 -20.84 dB , 对 II 类海区为 -41 dB ; $10 \lg T$ 、 $10 \lg V$ 及 $10 \lg f(Q)$ 均为 -3.98 dB 。

由此可以看出, 衰减的主要项是面积比, 依次是海水和云层, 从上面的数值可得总衰减范围是 $-112.35 \text{ dB} \sim -140.21 \text{ dB}$ 。

4 结果验证

由于 SLC 信道存在着许多不确定的因素, 很难对其建立一个完整的信道模型, 因此只能考虑一些主要参数, 利用这些参数优化系统设计。

我们到海南省某地做过海水对通信深度影响的实验, 并成功地进行了 50 m 的对潜通信实验, 3 次不同实验海区水样如表所示。

表 3 海南省某地水样参数

Table 3 Sea parameters in some place of Hainan

海域 Sea area	浪高 (m) Wave height	海深 (m) Sea depth	衰减值 (dB/m) Attenuation value
A 海区 Sea area A	3	56	1.3
B 海区 Sea area B	2.5	53	1.7
C 海区 Sea area C	1.5	73	1.2

当时正是台风过后几天, 海水混浊加大, 水样属 III 类海区。实验条件及通信深度结果推演如下:

- (i) 激光器输出单脉冲能量 $E_p = 87 \text{ dBm}$, $\lambda = 532 \text{ nm}$;
- (ii) 接收机灵敏度 $E_{r,m} = -50 \text{ dBm}$ (设备性能);
- (iii) 扩束损耗, 水下光斑面积 $S = 1.13 \times 10^6 \text{ cm}^2$, 接收光学天线面积 $A = 314 \text{ cm}^2$, 面积损耗比为 35.5 dB ;
- (iv) 50 m 深海水衰减为 (以 1.7 dB/m) -85 dB , 其余附加衰减约 12 dB ;
- (v) 信道总衰减为 $-35.5 \text{ dB} \sim -85 \text{ dB} \sim 12 \text{ dB} = -132.5 \text{ dB}$;
- (vi) 接收光功率 $E_r = 87 - 132.5 = -45.5 \text{ dBm}$ 。因为 $E_r > E_{r,m}$, 富余量 4.5 dBm 。

以上估算与实验结果推算基本接近理论值, 若在 I 类海区 (海水衰减值为 0.5 dB 左右), 系统实现 100 m 以上深度的通信是可能的。在实验室中我们也做过各种水样的对光信号的衰减实验, 发现水的纯净度、水中粒子悬浮物对激光散射有明显的影响, 证明了水质对通信深度影响很大, 而且通信深度与单脉冲能量 E_p 成非线性关系, 在通信距离不大时随 E_p 增大而增大, 但当达到一定深度时即使大幅度地增加 E_p , 通信距离也不会明显增加。由于大气之上的激光传输几乎无衰减, 所以我们主要考虑海水的影响。

(下转第 278 页 Continue on page 278)

$= 0$; 故 $\lim_{k \rightarrow \infty} \|x^{k+1} - x^k\| = \lim_{k \rightarrow \infty} \lambda_k \|q^k\| = 0$. 若 $\{x^k\}$ 有孤立极限点 x^* , 则由文献 [10] 中的定理 1.1.5 知 $\lim_{k \rightarrow \infty} x^k = x^*$.

4 算例

在以下两个算例中, 均取 $c_0 = 10, c = 0.1, U = 0.6$.

例 1^[12] $\min f(x) = x_1^2 - x_1x_2 + 2x_2^2 - x_1 - x_2$

s. t. $g_1(x) = x_1 + x_2 - 4 = 0,$
 $g_2(x) = -x_1 + x_2 + 3 \leq 0.$

例 2^[13] $\min f(x) = (x_1 - 2)^2 + (x_2 - 1)^2$

s. t. $g_1(x) = x_1 - 2x_2 + 1 = 0,$
 $g_2(x) = 0.25x_1^2 + x_2^2 - 1 \leq 0.$

用所给的算法 A 对例 1 和例 2 进行求解, 对不同的初始点 x^1 , 其运算结果反映在表 1 和表 2 中.

表 1 例 1 的求解结果

Table 1 Result of Example 1

初始点 Initial point	终止解 Terminative solution x^*	$f(x^*)$	迭代次数 Number of iteration
$\begin{pmatrix} 100 \\ 80 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 3.499996 \\ 0.499996 \end{pmatrix}$	6.999989	27
$\begin{pmatrix} -3 \\ -5 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 3.490966 \\ 0.508177 \end{pmatrix}$	6.930159	26
$\begin{pmatrix} 20 \\ 5 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 3.499996 \\ 0.499995 \end{pmatrix}$	6.999987	27

表 2 例 2 的求解结果

Table 2 Result of Example 2

初始点 Initial point	终止解 Terminative solution x^*	$f(x^*)$	迭代次数 Number of iteration
$\begin{pmatrix} -1 \\ 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.831365 \\ 0.915832 \end{pmatrix}$	1.372794	28
$\begin{pmatrix} 0.1 \\ 0.5 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.841335 \\ 0.912861 \end{pmatrix}$	1.350098	28
$\begin{pmatrix} -0.9 \\ 0.6 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.822872 \\ 0.911438 \end{pmatrix}$	1.393474	26

参考文献

1 Panier E R, Tits A L. A superlinearly convergent feasible

(责任编辑: 黎贞崇)

(上接第 255 页 Continue from page 255)

参考文献

1 贺细顺等. 海水散射引起激光脉冲传输延迟的研究. 激光与红外, 2001 (1).
 2 杜竹峰等. 激光对潜通信的信号能量传递计算. 华中理工大学学报, 1997 (8).

method for the solution of inequality constrained optimizations. SIAM J Control & Optimization, 1987, 25 (4): 934 ~ 950.
 2 Jian Jinbao, Zhang Kecun. A superlinearly and quadratically convergent type feasible method for constrained optimization. Appl Math J Chinese Univ Ser B, 2000, 15 (3): 319 ~ 331.
 3 简金宝. 非线性最优化一个超线性收敛的可行下降算法. 数学杂志, 1995, 15 (3): 319~ 326
 4 简金宝, 薛声家. 非线性约束最优化一族超线性收敛的可行方法. 数学研究与评论, 1999, 19 (1): 135~ 140.
 5 Gao Z Y. A superlinearly convergent feasible method for nonlinear programming with nonlinear inequality constraints part I -algorithm A. J of Northern Jiaotong University, 1996, 20 (1): 50~ 61.
 6 高自友, 吴方. 非线性约束条件下的 SQP 可行方法. 应用数学学报, 1995, 18 (4): 579~ 590.
 7 Polak E, Mayne D Q. Combined phase I -phase II methods of feasible directions. Math Prog, 1979, 17 (1): 32~ 61.
 8 Gao Z Y. A superlinearly convergent feasible method for nonlinear programming with nonlinear inequality constraints (part II) -subalgorithm A. J of Northern Jiaotong University, 1996, 20 (6): 629~ 634
 9 简金宝, 张可村. 不等式约束最优化一个具有强收敛性的强次可行方向法. 西安交通大学学报, 1999, 33 (8): 88~ 91.
 10 简金宝. 非线性约束最优化超线性与二次收敛算法的研究 (博士学位论文), 西安: 西安交通大学, 2000.
 11 简金宝. 次可行和强次可行方向法的研究. 见: 越民义. 最优化理论及应用. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1994, 113~ 118.
 12 简金宝. 最优化问题广义投影下的广义次可行方向算法. 广西科学, 1997, 4 (4): 246~ 250.
 13 赖炎连, 高自友, 贺国平. 非线性最优化的广义梯度投影法. 中国科学, 1992, 9 (A): 916~ 924.
 14 胡适全. 运筹学习题集, 北京: 清华大学出版社.
 15 希梅尔劳 D M. 实用非线性规划, 北京: 科学出版社, 1983.

3 Stotts L B. Closed form expression for optical pulse broadening in multiple-scattering media. Appl Opt Let, 1978, 17 (4).
 4 邹传云. 光无线 PPM 通信的研究 (博士论文), 成都: 成都电子科技大学电子工程学院, 1999.

(责任编辑: 黎贞崇)