

水声信道的研究与仿真

魏 莉, 许 芳, 孙海信

(厦门大学水声通信与海洋信息技术教育部重点实验室, 厦门 361005)

摘要: 文中提出的时变多径水声信道模型基本上实现了对海洋水声信道的模拟, 在一定程度上反映了海洋介质的物理特性; 对 Rayleigh 衰落模型的仿真, 反映了海洋介质的不均匀性以及信号在水声信道中传输的时变特性。每种信道模型都是对真实信道的近似模拟, 必然有其适用的范围, 要建立更加完善的信道模型还需要对更复杂的环境参数和信号的多径时变特性做进一步研究。

关键词: 水声信道; 射线理论; 多径; 信道仿真

中图分类号: TB556

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2008)-01-0025-05

Research and simulation on underwater acoustic communication channel

WEI Li, XU Fang, SUN Hai-xin

(Key Laboratory of Underwater Acoustic Communication and Marine Information Technology
(Xiamen University), Ministry of Education, Xiamen 361005, China)

Abstract: A computer simulation method of the multipath and time-variance underwater acoustic channel based on ray theory and statistical properties of the signal is proposed. Computer simulations of the channel with Rayleigh fading are performed, and the results are helpful to understand the characteristics of the underwater acoustic communication channel and to design underwater acoustic communication systems.

Key words: underwater acoustic communication channel; ray theory; multipath; channel simulation

1 引 言

随着海洋开发和信息产业的发展, 利用水声信道传送数据信息(如遥测数据、水下图像、环境系统中的污染检测数据等)的需求不断增加。由于水声信道的复杂性和不稳定性, 使得水声信道成为自然界中最复杂的无线通信信道。因此, 正确认识和了解水声信道的传播特性对于水声通信技术的发展具有重要意义。

水声信道是一复杂多变的信道, 具有衰减严重、多径效应和频散效应的特性。声信号在传播时的衰

减, 主要包括扩散损耗、吸收损耗和边界损耗, 它们都与传播距离和信号的频率有关。随着信号频率和传播距离的增加, 传播损失也随之增大。另外, 海洋环境噪声也会影响接收端的接收信噪比, 降低接收机性能。多径传播是水声信道的一个重要特性。造成多径传播的主要原因是声线弯曲(折射), 海底、海面以及水中物体等反射和海水内部结构(如内波、索波、潮汐等)的影响。频率扩散主要包括两个方面: 一是水声信道的不稳定性引起的信号频率扩展; 二是由于通信系统收发两端存在相对运动, 产生了多普勒频移。

水声通信信道仿真主要基于射线声学理论模型, 文献[1]集中给出了当前各种射线理论模型的解算方法, 文献[2]在射线理论的基础上, 分析了浅海水声信道的确定性模型和基于时延和幅度衰减的统计特性建立的随机统计模型, 但并没有涉及水声信道的多普勒频移特性。

收稿日期: 2007-09-22; 修回日期: 2007-12-21

基金项目: 水声通信中的 OFDM 技术关键问题研究及 DSP 实现
(60572106)

作者简介: 魏莉(1982-), 女, 河北人, 硕士, 研究方向: 先进通信技术研究。

通讯作者: 孙海信, E-mail, hisensessun@163.com

本文在射线声学理论的基础上,针对水声信道的传播特性,结合信号的统计特性,分析了一种多径——多普勒时变频移特性的信道简化模型,同时对仿真中的各种参数进行了一定的理论分析,通过仿真结果表明,该模型在一定程度上正确地模拟了海洋水声信道的传播特性。

2 水声信道模型与分析

射线理论是波动理论的一种近似。在经典射线声学中,对声场的描述是由射线来传递声能量的。声能量从声源出发,在空间中沿着声线按一定规律到达接收点,接收点收到的声能是所有到达射线的叠加。根据射线理论包含的描述声线轨迹的程函方程,可以建立浅海信道的射线简化模型,如图1所示。图1给出了四组典型声线,称为本征声线,即直达路径(DP)、折射——海面反射(RSR)、折射——海底反射(RBR)和折射——海面反射——海底反射(RSRBR)^[3]。

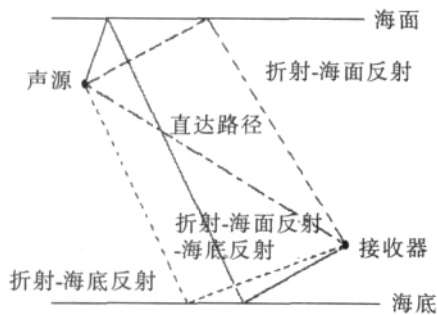


图1 浅海声场的基本声线图

Fig.1 Basic sound rays in shallow water

随着本征声线中海面和海底反射次数的增加,声线数目也会随之增加,每增加一次海面 and 一次海底反射,我们就认为构成了一条新的本征声线。接收点的总声场等于声信号沿每一条本征声线到达接收点的声强的总和,这样整个水声信道模型可以用图2来描述。

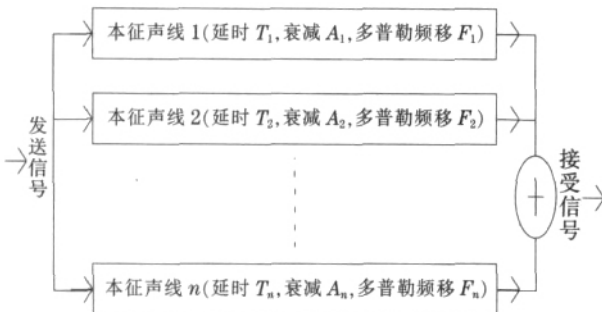


图2 水声信道模型

Fig.2 Model of underwater acoustic channel model

利用虚源等效反射声线的方法^[4],可以把每一根声线等效为一个对应的虚源所射出的到达接收点的直达声线。这样,接收点的总声场也就等于各个虚源与实源贡献的总和,即接收点的总声场是直达声线和反射声线的总和。以一条本征声线为例,通过计算本征声线的路径长度和声信号沿本征声线到达接收点的声强,分析得到声信号在该本征声线上的传播时延和衰减多普勒频移对信号的影响由 Rayleigh 衰落仿真体现。图3给出一条本征声线仿真框图。

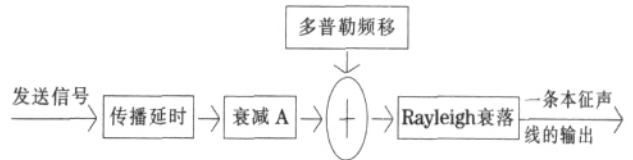


图3 一条本征声线的仿真框图

Fig.3 Simulation of a single eigenray

在无界时,声源辐射(忽略时间因子)在R处的声强可以用 $p_0 e^{ikR}/R$ 表示, p_0 是声压振幅, R 是声源与接收点的距离。当把虚源等效为一声源后,它辐射的声场也可以用 $V_{n1} p_0 e^{ikR_{n1}}/R_{n1}$ 来表示, R_{n1} 表示第 n_1 号虚源到接收点的直达距离, V_{n1} 是由反射次数和反射性质(海面或海底)所决定的。利用射线理论模型可以计算从声源沿各本征声线到达接收点的声强,其计算公式^[4]如下式(1):

$$\begin{cases} I_{n1} = \frac{p_0^2}{\rho C} \frac{V_1^{2n} V_2^{2n}}{R_{n1}^2} \\ I_{n2} = \frac{p_0^2}{\rho C} \frac{V_1^{2n} V_2^{2n+1}}{R_{n2}^2} \\ I_{n3} = \frac{p_0^2}{\rho C} \frac{V_1^{2n+1} V_2^{2n}}{R_{n3}^2} \\ I_{n4} = \frac{p_0^2}{\rho C} \frac{V_1^{2n+1} V_2^{2n+1}}{R_{n4}^2} \end{cases} \quad (1)$$

其中, R_{nk} ($k=1, 2, 3, 4$) 表示本征声线的路径长度, V_1 表示海底反射的衰减系数, V_2 表示海面的反射系数。

各本征声线的路径长度 R 可由下面的公式(2)计算得到^[3]:

$$\begin{cases} R_{n1} = \sqrt{r^2 + (2nH + z - z_0)^2} \\ R_{n2} = \sqrt{r^2 + (2nH + z + z_0)^2} \\ R_{n3} = \sqrt{r^2 + [(2n+2)H - z - z_0]^2} \\ R_{n4} = \sqrt{r^2 + [(2n+2)H - z + z_0]^2} \end{cases} \quad (2)$$

上式中, r 表示接收器与发射器的水平距离, z_0 表示发射器深度, z 表示接收器深度, H 表示海深。声信号从声源沿着本征声线, 以一定的衰减和时延到达接收点。每一条本征声线的路径长度不同, 相应的信号传输时间就不同, 衰减也不相同。

当收发器发生相对运动时, 接收信号会受到多普勒频移的影响, 信号频谱扩展。海水介质的随机起伏和各种环境噪声, 会使沿本征声线传播的信号上出现许多路随机分量信号。各路随机分量信号在接收点的入射角不同, 它们的多普勒频移也就不相同。假设入射角在 $[0, 2\pi]$ 之间服从均匀分布, 由此认为沿本征声线到达接收点的信号是主信号和随机分量信号的总和。当随机分量信号数目足够大时, 根据中心极限定理, 接收信号的包络服从 Rayleigh 分布, 相位服从均匀分布。水声信道的多径时变特性由此体现, 其 Rayleigh 衰落模型的等效低通表达式如下式(3)^[5]:

$$\begin{aligned} r(t) &= x_c(t) + jx_s(t) \\ &= \left[\sqrt{\frac{2}{N_I+1}} \sum_{n=1}^{N_I} \cos\left(\frac{\pi n}{N_I+1}\right) \cos(2\pi f_d \cos\left(\frac{2\pi n}{N_I}\right)t) + \frac{1}{\sqrt{N_I+1}} \cos(2\pi f_d t) \right] \\ &\quad + j \left[\sqrt{\frac{2}{N_I}} \sum_{n=1}^{N_I} \sin\left(\frac{\pi n}{N_I+1}\right) \cos(2\pi f_d \cos\left(\frac{2\pi n}{N_I}\right)t) \right] \quad (3) \end{aligned}$$

其中, $r(t)$ 表示沿本征声线到达接收点且经过 Rayleigh 衰落的信号; $x_c(t)$ 、 $x_s(t)$ 分别表示接收信号 $r(t)$ 的同相和正交分量; $N_I=1/2(N/2-1)$, N 表示随机信号分量的数目; f_d 是最大多普勒频移。

图 4 是 Rayleigh 衰落的仿真框图^[5]:

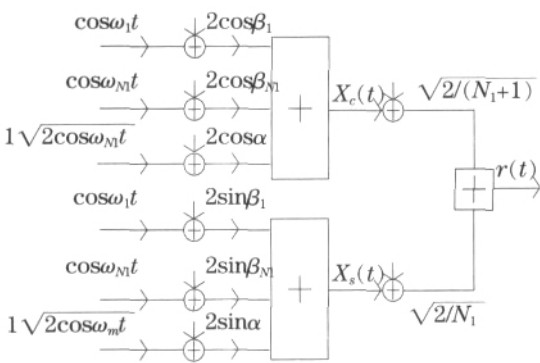


图 4 Rayleigh 衰落的仿真框图
Fig.4 Simulation of Rayleigh fading

图中同相分量 $x_c(t)$ 和正交分量 $x_s(t)$ 的表达式如下式(4):

$$\begin{aligned} x_c(t) &= 2 \sum_{n=1}^{N_I} \cos\beta_n \cos\omega_n t + \sqrt{2} \cos\alpha \cos\omega_m t \\ x_s(t) &= 2 \sum_{n=1}^{N_I} \sin\beta_n \cos\omega_n t + \sqrt{2} \sin\alpha \cos\omega_m t \quad (4) \end{aligned}$$

上式中, $\omega_n=2\pi f_d$; $\omega_n=\omega_n \cos(2\pi n/N)$, 表示第 n 路随机信号分量的多普勒频偏; 取 $\beta_n=\omega_n/(N_I+1)$; $\alpha=0$, 即得式(3)。

3 信道仿真

3.1 本征声线数目

由于海水介质的不均匀性和声源——接收器的位置分布不同, 本征声线数目是不确定的。当给定发射器和接收器的深度、收发器之间的水平距离以及海面 and 海底反射系数, 根据式(1)可以计算出本征声线的归一化衰减, 忽略能量小于直达声线十分之一的所有声线, 即得本征声线数。

3.2 传播时延

本征信号的传播时延等于路径长度除以声速。根据式(2)可计算出每条本征声线的路径长度, 海水中的声速可由经验公式(5)计算出:

$$c=1449.2+4.6T-0.055T^2+0.00029T^3+(1.34-0.010T) \times (S-35)+0.168P \quad (5)$$

其中, T 表示水温($^{\circ}\text{C}$), S 表示盐度(‰), P 表示静压力(大气压), 声速 c 的单位是 m/s , 该公式适用于 $0^{\circ}\text{C} \leq T \leq 35^{\circ}\text{C}$, $0 \leq S \leq 45\text{‰}$ 。其中参数值分别为水温 15°C , 盐度 35‰ , 水深 150m 即大气压 $P=16$, 计算得到声速 1467.85m/s 。

3.3 传播衰减

根据式(1)可以计算出本征声线的归一化声强, 开方就可以得到各本征声线的归一化振幅衰减, 直达本征声线的传播衰减可以根据射线理论计算得到。

3.4 多普勒频移

本征声线信号的最大多普勒频移 $f_d=vf_c/c$, 其中 v 是收发器的相对运动速度, f_c 是载波频率, c 是声速。最大多普勒频移 f_d 是 Rayleigh 衰落的仿真参数, 最大多普勒频移越大, 接收信号的包络波动起伏越明显。声波在海水传播的多普勒频移在几赫兹到几十赫兹之间变化, 可以通过设定不同的收发器相对运动速度来改变最大多普勒频移。

3.5 仿真分析

将 3 个频率分别为 10kHz , 10.01kHz 和 10.02kHz 的单频信号作为输入信号, 通过水声信道模型进行仿真。图 5 是输入信号的波形, 时间长度 0.5s 。

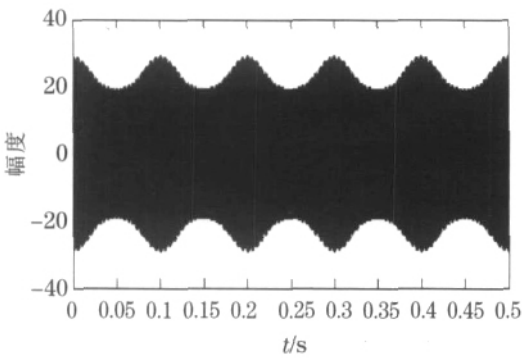


图5 输入信号波形
Fig.5 Input signal

参考厦门港浅海海域物理特性统计数据,信道参数设置如下:

接收器与发射器的水平距离 $r=10\text{km}$, 发射器深度 $z_0=10\text{m}$, 接收器深度 $z=50\text{m}$, 海深 $H=100\text{m}$, 海底反射的衰减系数 $V_1=0.9$, 海面的反射系数 $V_2=0.5$, 最大多普勒频移 $f_d=20\text{Hz}$ 。

根据式(1)和式(2)计算出本征声线的数目为7, 每条本征声线的传播时延和归一化衰减如表1。

表1 各本征声线信号参数表
Table 1 Parameters of each eigenray signal

各本征声线	相对时延/ms	归一化幅度衰减
本征声线1	0	0.01
本征声线2	0.07	0.0071
本征声线3	0.61	0.0095
本征声线4	0.82	0.0067
本征声线5	1.91	0.0045
本征声线6	2.25	0.0032
本征声线7	3.88	0.0043

运行仿真程序,得到一条本征声线的输出波形如下图6。

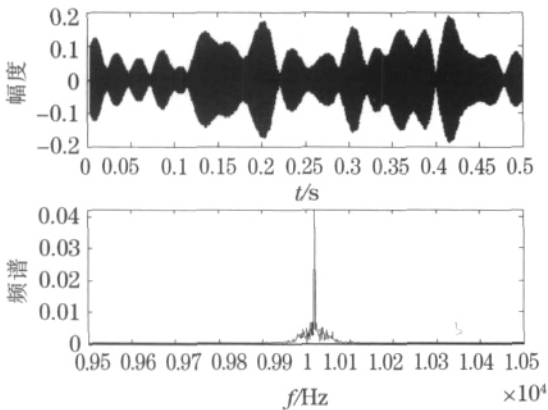


图6 一条本征声线的输出波形及其频谱
Fig.6 Output of a single eigenray and frequency spectrum

由图6可以看出输入波形沿一条本征声线传播,接收信号幅度发生了衰减,信号频谱出现了多普

勒扩展,由于海水介质的不均匀性和随机起伏,信号包络服从 Rayleigh 分布。

水声信道的总输出是多条本征声线输出的叠加,仿真结果如下图7所示。

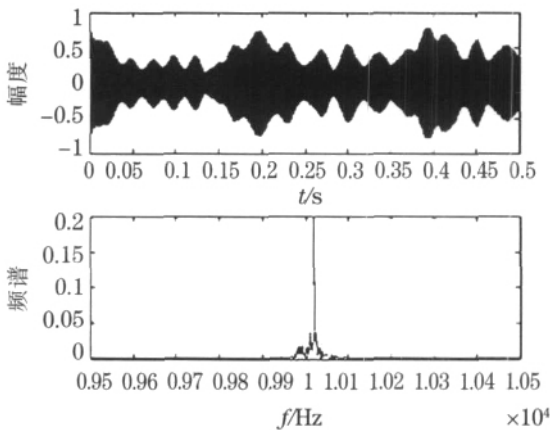


图7 信道总输出信号及其频谱
Fig.7 Output of the channel and frequency spectrum

修改信道参数,通过公式(1)和(2)计算分析可得不同参数对信道特性的影响。表2是在发射器深10m,接收器深50m,海面反射系数0.5,海底反射系数0.9的情况下,不同的收发器水平距离和海深时,本征声线的数目以及各本征声线的归一化幅度衰减和相对延时的变化。

表2 不同收发器的距离和海深下各本征声线的衰减和相对延时
Table 2 Parameters of each eigenray signal for $r=10\text{km}$ and $r=50\text{km}$

收发器的水平距离 r/km	10	10	50	50	
海深 H/km	0.1	0.5	0.1	0.5	
本征声线的数目	7	7	7	7	
前 3 条本征声线	本征声线 1	0.01	0.01	0.004	0.004
的归一化幅度衰	本征声线 2	0.0071	0.0071	0.003	0.003
减系数	本征声线 3	0.0095	0.0095	0.004	0.004
前 3 条本征声线	本征声线 1	0	0	0	0
的相对延时/ ms	本征声线 2	0.07	0.07	0.10	0.10
	本征声线 3	0.61	3.88	0.73	6.00

从表2中数据可以看出,在收发器的水平距离一定时,随着海深的增加,各本征声线的相对时延增大,但衰减基本不变。当收发器之间的水平距离增大时,各本征声线的相对时延增大,衰减加剧,但对本征声线的数目没有明显的影响。

表3是发射器深10m,接收器深50m,海深100m,收发器距离水平距离10km,海面和海底反射系数在0.3~0.9之间变化时,本征声线的数目以及各本征声线的归一化幅度衰减和相对延时的变化。

表 3 不同收发器的距离和海深下各本征声线的衰减和相对延时
Table 3 Parameters of each eigenray signal for
 $V_1=0.5,0.7,0.9$ and $V_2=0.3,0.4,0.5$

海底反射系数 V_1		0.5	0.7	0.9
海面反射系数 V_2		0.3	0.4	0.5
本征声线的数目		4	4	7
前 4 条本征声线 的归一化幅度衰 减系数	本征声线 1	0.01	0.01	0.01
	本征声线 2	0.0055	0.0063	0.0071
	本征声线 3	0.0071	0.0084	0.0095
	本征声线 4	0.0039	0.0053	0.0067
前 4 条本征声线 的相对延时/ms	本征声线 1	0	0	0
	本征声线 2	0.07	0.07	0.07
	本征声线 3	0.61	0.61	0.61
	本征声线 4	0.82	0.82	0.82

从表中数据可以看出,海面、海底反射系数对衰减和本征声线数目有明显的影响。

4 结 论

本文提出的时变多径水声信道模型基本上实现了对海洋水声信道的模拟。基于射线理论模型提出

的本征声线模型,在一定程度上反映了海洋介质的物理特性;对 Rayleigh 衰落模型的仿真,在一定程度上反映了海洋介质的不均匀性以及信号在水声信道中传输的时变特性。当然,每一种信道模型都是对真实信道的近似模拟,必然有其适用的范围,要建立更加完善的信道模型还需要对更复杂的环境参数和信号的多径时变特性做进一步研究。

参 考 文 献

[1] Kilfoyle D B, Baggeroer A B. The state of the art in underwater acoustic telemetry[J]. IEEE Journal of Oceanic Eng., 2000, 25(1): 4-27.

[2] Adam Zielinski, YoungHoon Yoon, WU Lixue. Performance Analysis of digital acoustic communication in a shallow water channel[J]. IEEE Journal of Oceanic Eng., 1995, 20(4): 293-299.

[3] Paul C. Etter. 水声建模与仿真(第三版)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.

[4] 涂峰, 黄瑞光. 水声信号的建模与仿真研究[J]. 微机机信息, 2003, 19(5): 76-77.

[5] William C. Jakes. Microwave mobile communication[M]. New York: IEEE Press, 1994.

[6] John G. Proakis. 数字通信(第四版)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003. 577-585.