一种抗信道多径的扫频-扩频调制技术

石维欣，张 歆
(西北工业大学航海学院，西安 710072)

摘要：水声信道是复杂的多径快衰落信道，其信道特性严重影响了水声通信的数据率和性能，抗多径干扰是提高水声通信系统性能的重要技术之一。对一种新的调制方法——扫频-扩频载波(Sweep-Spread Carrier, SSC)调制技术进行了深入研究，通过系统在水声信道实际数据的仿真，探究 SSC 的抗多径性能，简化了抗信道多径算法。SSC 的基本思路是采用连续变化的载波频率，通过相关接收，将接收的多径信号在频域上分离，从而克服了码间干扰的影响。分析了在给定系统时不同信道多径时延对 SSC 性能的影响，以及给定信道时不同 SSC 参数对 SSC 性能的影响。仿真结果表明，选择合适的参数，SSC 调制具有良好的抗多径性能。

关键词：抗多径技术；扫频-扩频载波调制；多径分离；水声通信
中图分类号：TB556 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-3630(2011)-04-0369-04
DOI 编码：10.3969/j.issn1000-3630.2011.04.015

An anti-multipath technique--Sweep-Spread Carrier modulation

SHI Wei-xin，ZHANG Xin
(*College of Marine, Northwestern Polytechnical University, Xi'an* 710072, *China*)

Abstract: Underwater channel is a multipath, complex fading channel, which badly affects the data-rate and the performance of underwater acoustic communication. Anti-multipath is an important measure to improve the performance of underwater acoustic communication. A new modulation method – SSC (Sweep-Spread Carrier) is studied in this paper. Through the simulation with actual data of underwater acoustic channel, the anti-multipath performance of SSC is investigated and the anti-multipath algorithm simplified. The basic idea of SSC is that the continuously variable frequency of the carrier is used to change the time-delay caused by multipath channel into frequency interval, and so the multipath-signals are separated in frequency domain, which well overcomes the intersymbol interference (ISI). The effects of the different multipath channels and the different parameters of SSC for a given channel on the performances of SSC are analyzed. Simulation results confirm that the SSC modulation method has a good performance of anti-multipath for appropriately selected parameters.

Key words: anti-multipath; Sweep-Spread Carrier; multipath separation; underwater acoustic communication

0 引 言

水声信道中的多径传播会使高速传输的水声通信信号产生码间干扰(ISI)，造成信号的严重失真。因此，高速水声通信系统中需要采用抗多径技术，如判决反馈均衡器等自适应均衡技术，来抵消码间干扰的影响。但随着水声通信系统数据率的提高，自适应均衡器的结构及算法复杂度也越来越高，甚至影响到均衡器的实现及其稳健性。为此，简单、有效的抗多径技术，包括多载波调制技术、分集技术都在水声通信中得到了更多的研究[1,2]。

2000 年，Kebkal 提出了一种新的抗多径调制方式——扫频-扩频调制[3,4]。在传统的调制技术中，在一个符号内，信号载波的频率是不变的；而在扫频-扩频调制中，用线性调频(LFM)信号使得信号载波产生周期性的变化。在接收端，利用扫频-扩频的相关接收，将时域上不同时延的多径信号转变为频域上有相应频率间隔的频率信号，通过带通滤波器在频域上分离多径信号，从而以较低的复杂度大大减小了 ISI 的影响。Kebkal 通过仿真和海试验证了扫频范围在 40~80kHz 之间的扫频-扩频调制方式的可行性。

本文对扫频-扩频载波(Sweep-Spread Carrier, SSC)调制方法进行了进一步的分析，研究了改变扫频信号的周期等参数对 SSC 调制性能的影响，并探讨这种新颖的调制方式在水声通信系统中的可实现性。

收稿日期：2010-09-03；**修回日期**：2010-11-15
作者简介：石维欣(1984-)，男，河北唐县人，硕士研究生，研究方向为水声通信。
通讯作者：石维欣，Email: shiweixin-x@163.com

1 扫频-扩频载波信号的原理

扫频-扩频载波(SSC)信号由周期性的线性调频(LFM)信号组成，其信号示意图如图 1 所示, SSC 信号可以表示为[3]

$$c(t)=A_c\exp[\mathrm{j}(\omega_l(t-\left[\frac{t}{T_{sw}}\right]T_{sw})+m(t-\left[\frac{t}{T_{sw}}\right]T_{sw})^2)]=$$
$$A_c\exp[\mathrm{j}(\omega_l t_c+mt_c^2)]$$

式中，A_c 为信号幅度，$m=(\omega_h-\omega_l)/2T_{sw}$ 是频率变化速率，ω_l 为扫频范围的最低频率，ω_h 为最高频率，T_{sw} 为扫频时间，$[t/T_{sw}]=S_n$ 为整个扫频-扩频载波信号包含的扫频信号的数目，$t_c=(t-[t/T_{sw}]T_{sw})$。

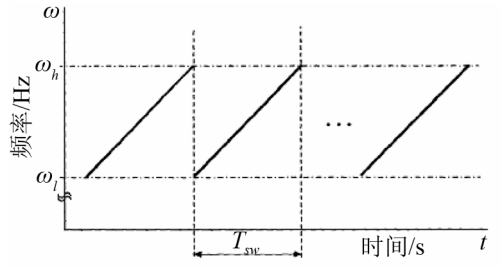


图 1 扫频-扩频载波信号示意图
Fig.1 Diagram of sweep-spread carrier signal

由图 1 可以看到，SSC 信号是由一组扫频信号组成的。设 BPSK 调制的信号为 $s(t)$，其码元宽度为 T_s，经 SSC 调制后得到发射信号 $x(t)$：

$$x(t)=s(t)c(t)=\frac{1}{2}\left[\sum_n \alpha_n g(t-nT_s)\right]\cdot$$
$$\left(\exp\left[\mathrm{j}\left(\omega_l t_c+mt_c^2+\omega_c t\right)\right]+\exp\left[\mathrm{j}\left(\omega_l t_c+mt_c^2-\omega_c t\right)\right]\right)$$

式中，α_n 为二进制相位编码，$g(t)$为幅度为 1、宽度为 T_s 的波形成形信号，$c(t)$是由式(1)表示的 SSC 载波信号。为简便起见，设信号幅度为 1。选择 SSC 信号的符号宽度 $T_{sw}=kT_s$，其中，$k\geq 1$ 为整数。经多径信道传输后，在接收端接收到的信号为多径信号的叠加，即：

$$y(t)=\alpha_0 x(t)+\sum_{i=1}^{N-1}\alpha_i x(t-\tau_i)\exp[\mathrm{j}(-\Delta\omega_i t_c+\phi_i)]+n(t)$$

式中，N 为可分辨的路径数，α_i、τ_i 分别为各路径幅度衰减和时延，$i=1,\ldots,N$，$\Delta\omega_i=2m\tau_i$ 为第 i 个路径因时延 τ_i 造成的频偏，$\varphi_i=m\tau_i^2-\omega_l\tau_i$ 为第 i 个路径的相位，$n(t)$为噪声。α_0 表示最先到达路径的幅度衰减，其他路径的时延用该路径的时延进行了归一化。当信号经过多径信道时，经由不同路径到达接收端的信号的时延不同，通过对 LFM 信号的相关接收，每个多径信号将产生不同的频偏，从而将多径信号在频域上分开。

按照文献[3, 4]，在对 SSC 信号进行解调时，在接收端产生一个同发射端有相同频带宽度和频率变化率的本地 SSC 信号。为使信号的频谱落入合适的带宽内，本地 SSC 信号与发射的 SSC 信号的频谱相差一个中频频率 ω_{IF}。接收信号和本地 SSC 信号相关后，得到的频谱以两倍中频频率为对称，低频范围内的频谱是所需频谱，经低通滤波器滤除高频部分。相关接收及低通滤波后的信号频谱如图 2 所示。

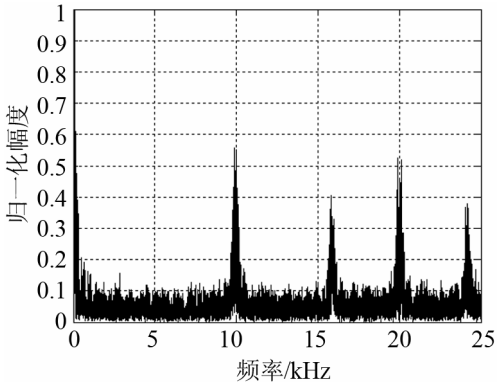


图 2 SSC 相关接收信号频谱图
Fig.2 Spectrum of coherent output of received SSC signal

在对图 2 进行仿真时，采用文献[3]中给出的 SSC 信号参数，即扫频范围为 40~80 kHz，中频频率 ω_{IF}=10 kHz。仿真时，信道采用有 5 条传播路径的水声信道模型，信噪比 SNR=12 dB。由图 2 可见，接收信号与本地 SSC 信号相关后，各个多径信号在频域上分开，主要路径信号出现在零频附近。

按照文献[3]，多径信号在频域中的频率间隔 $\Delta\omega_i$ 与多径信号之间的时延 τ_i 之间的关系为

$$\Delta\omega_i=2m\tau_i$$

于是，通过带通滤波器(或低通滤波器)就能在频域上分离出各多径信号，而且 SSC 信号频带越宽，频率变化率越快，多径分辨率越好[3,4]。如果各个多径信号的频谱分量得到很好地分离，就可有效地克服码间干扰的影响。

2 扫频-扩频载波调制的实现

信息序列首先经 BPSK 调制变为相位编码的信号，然后经 SSC 调制，经水声多径信道传输。在接收端信号首先与本地 SSC 信号相关解扩，经低通滤波器滤除高频部分，获得类似于图 2 所示的低频频谱；对信号进行频谱估计并设计合适的带通滤波器将多径信号在频域上分离。由于信号已经经过相关解扩降到中频，所以可直接对信号抽样判决，恢复出原始信息。SSC 信号调制解调的原理框图如图 3 所示。

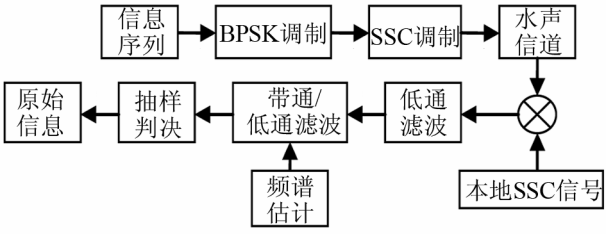


图 3　SSC 调制原理框图
Fig.3　Schematic diagram of SSC modulation

在设计 SSC 调制时，需考虑 3 个关键参数的选择：SSC 信号的扫频周期 T_{sw}，频率变化率 m，以及 SSC 信号包含的扫频个数 S_n。

由图 2 可知，为了避免各多径信号在经过 SSC 相关输出后出现频域上的混叠，扫频周期 T_{sw} 要大于信道的时延扩展 τ_{mp}。但当 T_{sw} 增大时又会使频率变化率 m 减小，多径信号的频偏也随之减小，不利于系统对接收端信号频谱的分离，所以该参数要折中选择。

SSC 信号的频率变化率 m 的选取和信道的最小多径时延 $\tau_{\min}$ 和时延扩展 τ_{mp} 有关。为了增加多径 SSC 相关解调信号在频域上的间隔，m 的范围应该满足：

$$\frac{R}{2\tau_{\min}} \le m \le \frac{\omega_h - \omega_l}{2\tau_{mp}}$$

式中，$R=1/T_s$ 为码元速率。

增加 SSC 信号包含的扫频个数 S_n 可以提高 SSC 信号的数据率。但仿真发现，当 S_n 增大时，接收端信号的频谱会密集在某一频段，也会造成各路径信号的频谱相互混叠，滤波器将很难实现很窄的带宽，提取主径频谱，所以 S_n 的取值也需折中考虑。

由此可见，SSC 调制的主要参数与信道情况密切相关，下面将通过仿真分析不同参数的选择对 SSC 调制性能的影响。

3　SSC 调制性能的仿真

文献[3, 4]中对 SSC 调制进行了可行性分析和试验，其选择的参数为扫频范围 40~80 kHz，中频频率 ω_{IF}=10 kHz。为了使 SSC 系统应用到实际水声通信系统中，本文对 SSC 调制在更低扫频(5~30 kHz)范围内的性能进行了仿真分析，并分析了其他参数对 SSC 性能的影响。

仿真时采用的水声信道数据如表 1 所示。信道参数由射线模型计算产生，信道水深为 50 m，射线模型输入为实测的声速-深度值，传输距离为 3 km，表中所有数据都用最先到达路径数据进行了归一化。信道 1 的最小时延 $\tau_{\min}$=21.8 ms，最大时延 $\tau_{\max}$=35 ms，信道 2 的最小时延 $\tau_{\min}$=5.9 ms，最大时延 $\tau_{\max}$=44 ms。由于 SSC 信号是宽带信号，信道衰减随信号频率的增大而增大，但模型计算表明，对于 3 km 信道，当信号频率为 5~30 kHz 时，信道衰减幅度相差约 0~10 dB。为了简化分析，着重研究 SSC 信号的抗多径性能，仿真模型忽略了幅度的影响，表 1 所示信道参数是信号频率为 10 kHz 时的信道数据。

表 1　信道 1、2 的参数
Table 1　Data of Channel-1 and Channel-2

	信道 1				信道 2			
路径数目	1	2	3	4	1	2	3	4
归一化幅度	1.00	1.00	1.01	1	1.00	1	1.01	1.00
归一化时延/ms	0	22.9	21.8	35.0	5.9	0	32	44

仿真时，SSC 信号的频率参数选择范围为 5~30 kHz，扫频宽度选为 5~20 kHz，SSC 信号包含的扫频个数 S_n=1~4。采用蒙特卡罗仿真，仿真数据数为 10000。首先研究不同多径信道时延对 SSC 性能的影响，然后研究不同 SSC 参数对其性能的影响。

3.1　不同信道对系统的影响

图 4、5 分别是扫频宽度为 10 kHz(f_l=10 kHz, f_h=20 kHz)，S_n=1，符号持续时间 T_{sw}=0.4 s 的 SSC 信号经相关接收后的频谱图，图中，信噪比 SNR=12 dB，图 6 给出了两信道中 SSC 信号的误码率曲线。

由图可见，信道 2 中多径信号的频率间隔要大于信道 1 中的信号频率间隔，对比两信道参数可知，各路径之间的时延越大，越有益于多径信号在频域上分离，相应的 SSC 信号也有更好的误码率性能。

上述仿真表明，信道参数对 SSC 的性能有较大的影响，因此，在给定信道参数时，需要仔细地设计 SSC 的参数。

3.2　不同扫频宽度的性能仿真

首先分析不同扫频宽度对 SSC 性能的影响。图

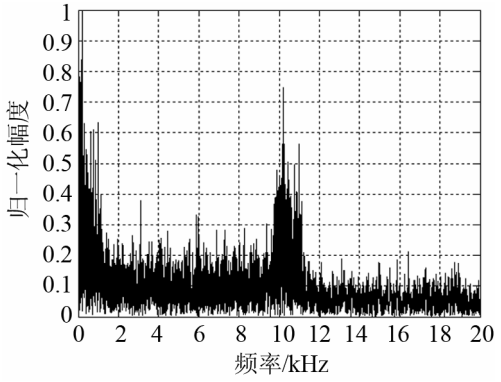


图 4　信道 1 下接收信号的频谱图
Fig.4　Spectrum of received signal in Channel-1

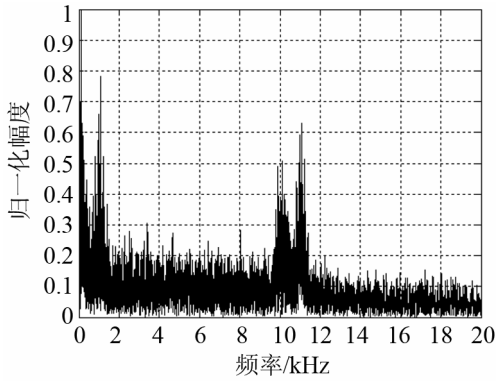


图 5 信道 2 下接收信号频谱图

Fig.5 Spectrum of received signal in Channel-2

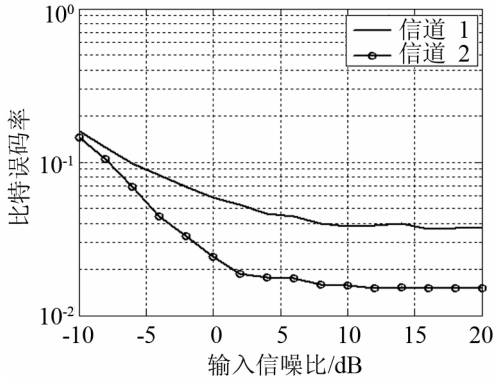


图 6 信道 1、2 下的误码率曲线图

Fig.6 Error rates of Channel-1 and Channel-2

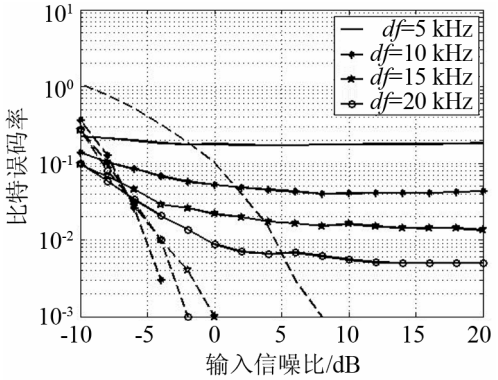


图 7 不同扫频宽度，信道 1、2 下误码率曲线图

Fig.7 Error rates of Channel-1 and Channel-2 for different sweep-width

7 给出了中心频率 f_0=20 kHz，扫频宽度 df 为 5~20 kHz 时，信道 1(实线)、2(虚线)的仿真结果，仿真时其他参数不变。

由图 7 可见，当扫频宽度变宽时，SSC 信号误码率降低。这是因为当扫频宽度变宽时，SSC 的多径分辨能力增强，在频域上主径信号受到其他多径信号的干扰减小，从而使得系统的误码率降低。

3.3 不同扫频个数的性能仿真

图 8 是扫频个数 S_n=1~4，仿真点数为 40000，其他参数不变时，信道 1(实线)、2(虚线)下的误码率曲线图。由图 8 可见，当扫频个数 S_n 增大时，系统误码率曲线显著下降，系统性能明显提升，这是因为 S_n 增大时，每个扫频信号调制的码元数变少，以至每个码元所占据的时间宽度相对增加，反映到 SSC 信号上，即增宽了每个码元所占据的扫频宽度，而当 SSC 信号扫频宽度增宽时其抗多径能力增强，所以使整个系统的性能得到了提升。

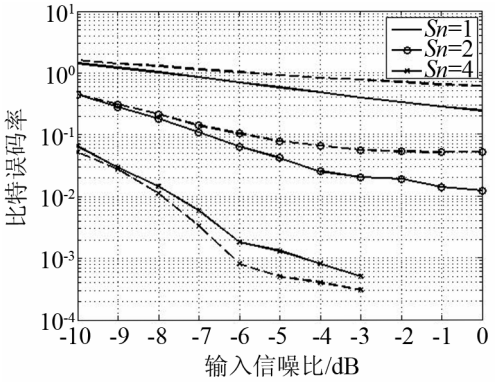


图 8 信道 1、2 下不同 S_n 误码率曲线图

Fig.8 Error rates of Channel-1 and Channel-2 for different S_n

4 小 结

本文对 SSC 调制的抗多径性能进行了分析，研究了不同 SSC 信号参数对 SSC 调制系统性能的影响。表明 SSC 调制方法具有良好的抗多径性能。

作为一种新的抗多径调制方法，SSC 调制还需要更多的分析和试验，在误码率平台、多径信号的组合方面还需要更多的研究工作。

参 考 文 献

[1] Justin Coon,Simon Armour. Adaptive frequency-domain equalization for single-carrier multiple-input multiple-output wireless transmissions[J]. IEEE Signal Processing Society, 2005, **53**(8): 3247-3256.

[2] Morozov Andrey K, Preisig James C. Underwater acoustic communications with multi-carrier modulation[J]. OCEANS, 2006: 1-6.

[3] Kebkal Konstantin G, Rudolf Bannasch. Sweep-spread carrier for underwater communication over acoustic channels with strong multipath propagation[J]. J. Acoust. Soc. Am., 2002, **112**(5): 2043-2052.

[4] Kebkal Konstantin G, Rudolf Bannasch. Implementation of a sweep-spread function for communication over underwater acoustic channels[C]// OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition, 2000, 3: 1829-1837.