

香农公式在扩频通信中的应用

刘昌锦, 韦哲

(解放军陆军军官学院, 合肥 230031)

摘要: 为了定量研究扩频通信的可靠性, 从香农公式的基本原理出发, 以扩频系统中具有代表性的直扩系统(DS)为例, 分析了信号的发生、发送、接收、解扩和解调的过程, 探讨了其中带宽和信噪比的变化, 并以公式和曲线的形式, 从信噪比改善的角度说明了扩频通信的可靠性, 仿真验证了结论的正确性。

关键词: 香农公式; 扩频; 信噪比

中图分类号: E96

文献标识码: A

文章编号: 1006-0707(2013)04-0080-04

Research on Application of Shannon Formula in Spread Spectrum Communication

LIU Chang-jin, WEI Zhe

(Army Officer Academy, Hefei 230031, China)

Abstract: For the sake of studying the reliability, through the basic principle of Shannon Formula, and in the case of representative Direct Sequence (DS), the study analyzed the whole processing of signal's producing, sending, receiving, demodulation, and discussed the change of the bandwidth and the SNR. In the form of formula and image, it explained the improvement of the SNR and the reliability of spread spectrum communication. The simulation verified the conclusion's accuracy.

Key words: Shannon formula; spread spectrum; SNR

扩频通信是围绕提高信息传输的可靠性而提出的一种有别于常规通信系统的新理论, 其构想形成于二战时期, 理论形成与40年代末, 50年代初期, 60年代首先在军事通信保密和抗干扰领域获得应用, 70年代以来, 尤其是其突出的抗干扰性能, 扩频通信(CDMA)系统在移动通信领域占有重要的地位。

1 香农公式

香农公式是扩频通信的理论基础, 它直接反映了信道容量和信号功率、噪声功率的函数关系。信道容量的概念是由平均互信息量定义的^[1]。平均互信息量 $I(X; Y)$ 是指信宿平均每接收到一个符号, 所能得到信源发送符号的信息量。若取样频率一定, 就可转化为信息传输速率。因此, 发送符号的速率快并不能说明信息速率大。

香农公式指出, 当信号的有效带宽为 B , 信号和噪声功率率分别为 S 和 N 时, 极限信息传输速率即信道容量 C 为

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \text{ (bit/s)}$$

满足的条件是: 连续消息是平均功率受限的高斯随机过程; 噪声为加性高斯白噪声。由香农公式可以得到以下结论。

1) 无论采用何种编码方式, 信息速率 $R \leq C$, 但在允许的信息速率之下总可以找到某种编码系统, 以任意小的差错概率传送信息。为差错控制编码提供了理论依据。

2) 在保持信息传输速率不变的条件下, B 和 $\frac{S}{N}$ 可以互换, 甚至可以在 $\frac{S}{N} \ll 1$ 的情况下进行可靠通信。

如图1理想情况下, 假设解调器两端都达到极限信息传

输速率,即

$$R_i = B_i \log_2 \left(1 + \frac{S_i}{N_i} \right) \quad R_o = B_o \log_2 \left(1 + \frac{S_o}{N_o} \right)$$

在 $R_i = R_o$ 且 $S_i/N_i \gg 1$ 和 $S_o/N_o \gg 1$ 的情况下,参考文献[2]中给出了

$$\frac{S_o}{N_o} \approx \left(S_i/N_i \right)^{B_i/B_o}$$

在理想带通系统中,输出信噪比随着带宽比值按指数规律变化。为了提高通信有效性,可以增加发射功率,也可以展宽带宽,而实际中展宽带宽显然比增加功率更易实现,且能够有效提高信噪比。

3) 传输信号的有效带宽越宽,信噪比越高,信道容量越大。但当 $B \rightarrow \infty$ 时,有 $\lim_{B \rightarrow \infty} C \rightarrow \log_2 e \frac{S}{N} = 1.44 \frac{S}{n_0}$,因此不能用无限带宽换取信道容量,说明带宽换信噪比是有条件的。下

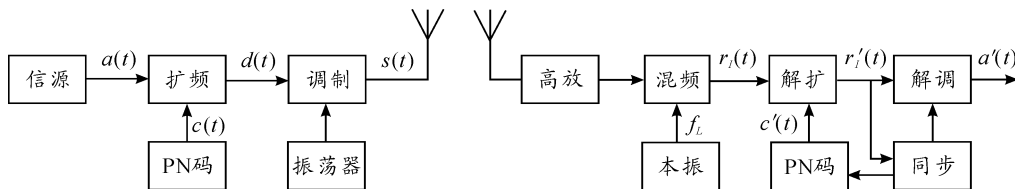


图2 DS系统基本框图

设信号源发出的信息流为二进制双极性不归零码 $a(t)$, 码元宽度为 T_a , 当发送0码和1码等概时,参考文献[4]中给出了 $a(t)$ 的功率谱密度函数

$$P_a(\omega) = T_a S_a^2 (\omega T_a / 2)$$

伪随机序列 $c(t)$ 的定义与 $a(t)$ 相似,但是周期的, $c(t)$ 与 $a(t)$ 相乘完成扩频调制,射频调制采用PSK,功率谱如图3。

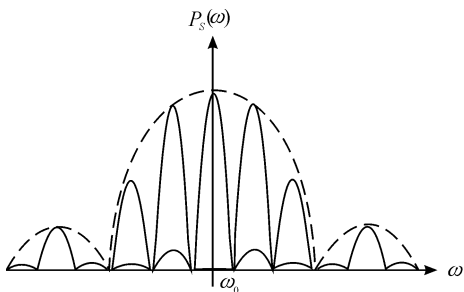


图3 扩频调制后信号的功率谱

接收的过程是超外差式,可以避免瞄准式干扰,无噪声干扰时可恢复原功率谱。信道传输中加入噪声,接收端解调和混频通常是一并进行的。对于有用信息,只要本地PN码 $c'(t)$ 与 $c(t)$ 相同,码位对准,经过相关运算就可以无损地恢复 $a(t)$ 。对于带限高斯白噪声 $n(t)$,经过混频、解扩后相当于分散了其功率

$$P_n(\omega) = \frac{1}{8\pi} n_0 B / 2 * P_c(\omega) *$$

面将从理论分析和仿真验证两方面说明香农公式的应用。

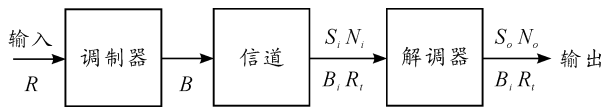


图1 理想带通系统原理框图

2 扩频理论分析

2.1 扩频通信系统结构

扩频通信系统的调制过程分为扩频调制和射频调制,按照扩频方式的不同可分为直接序列(DS)扩频、跳频(FH)、线性调频(Chirp),以及混合方式。在这里以DS系统为例,分析调制前后频谱的变化。

$$[\delta(\omega - \omega_0 - \omega_{IF}) + \delta(\omega + \omega_0 + \omega_{IF})]$$

进一步解调和滤波,可消除噪声的大部分分量,而保留信号的大部分频率,从而提高可靠性。

2.2 伪随机码与白噪声比较

白噪声是一种理想的宽带随机过程,它的瞬时值服从正态分布,功率谱密度在整个频域内是均匀的,自相关函数是在 $\tau=0$ 点的冲击,即不同时刻开始的同一噪声源发出的白噪声,自相关为零。

由于理想白噪声具有良好的自相关特性,无法实现对白噪声的放大、调制、检测、同步,如能人工模拟,可以用于保密通信而不被截获。但白噪声是连续随机过程,很难模拟其统计特性,但在工程上可用多进制脉冲码元在相关特性上逼近白噪声。伪随机码(PN码)是一种具有类似白噪声性质的码,大部分伪随机码是周期码,可以人为地产生和复制,通常由二进制移位寄存器来产生。

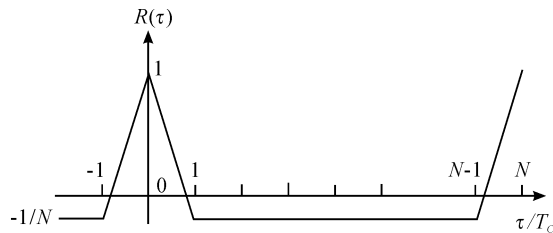


图4 m序列自相关函数

用m序列作为伪码,其自相关函数如图4。在一个周期内很好地逼近了白噪声的相关特性,并且随着N的增加,在

$\tau = kN$ 附近越尖锐,其它地方越接近于 0,逼近效果越好。以下将通过模拟仿真进一步验证理论的正确性。

3 仿真与结论

利用 Matlab 仿真整个 DS 调制和解调、解扩过程。整个程序分为过程模块、随机码模块、码形产生模块、噪声产生模块,所有模块都为函数形式,过程模块为主体,调用其它函数,自变量为 PN 码宽度。仿真步长为 0.001,信息码、PN 码由随机码模块产生,并由码形产生模块产生近似连续的码形。噪声产生模块产生与信息码点数相同的噪声序列。调制采用 BPSK,载波用余弦函数的离散点代替,频率为 PN 码频率的 2 倍。

依照图 5 的流程,为了简便,在解调的过程中不采用外差式相关,而采用直接式相关。用 m 序列发生器产生一段长度为 7 的随机信号和长度为 31 的 PN 码,令信号码宽为 1,PN 码宽为 1/4(如图 6),可计算输入信号功率为 $S_i = 1.0014$ 。高斯白噪声功率 $N_i = 8.8597$,输入信噪比为 $S_i/N_i = -21.8012$ dB,信号完全湮没在噪声里。

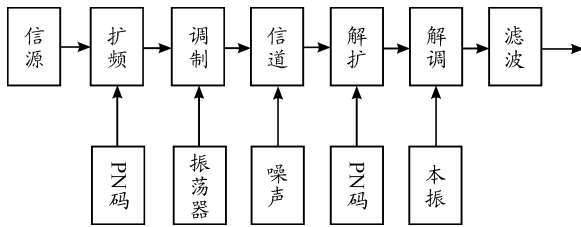


图 5 仿真流程

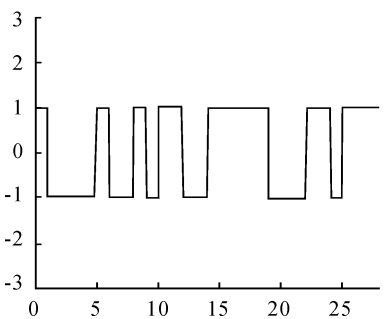
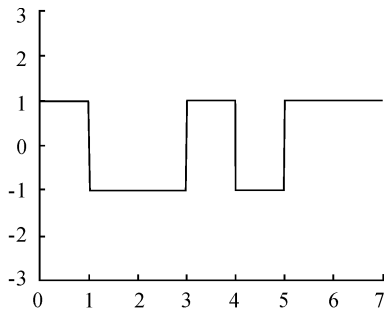


图 6 信息码和 PN 码波形

在接收端用同频率载波与之相乘,完成解调,再用相同的 PN 码与之相乘,完成解扩。得到其频谱如图 7 所示(横轴

为归一化频率 $f' = f/f_s$,其中 $f_s = 100$)。

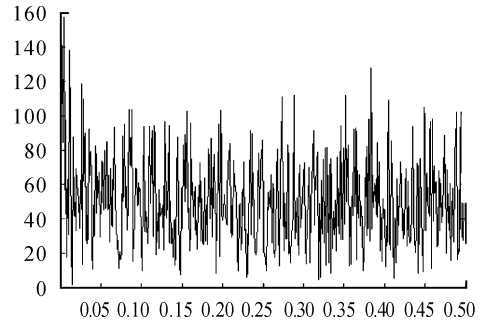


图 7 解调、解扩后的频谱

信号频谱的主要能量集中于 $f' \leq 0.01$ (归一化频率),而高频分量的能量也很大,这些分量主要是被分散功率的噪声。为了滤除这些分量,用切比雪夫最佳一致逼近设计 FIR 低通滤波器,截止频率设在 $f_c = 0.01$ 处,对其进行滤波,结果如图 8。

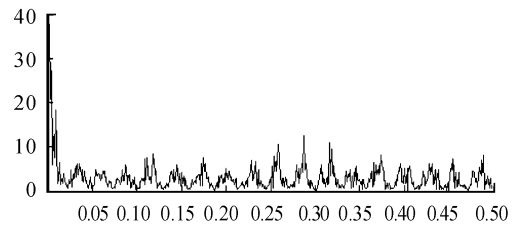
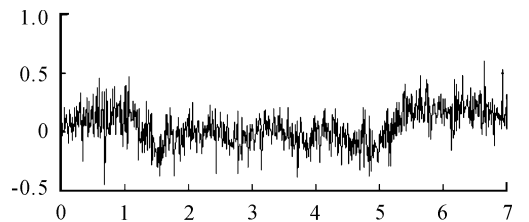


图 8 滤波后的波形和频谱

此波形虽然可以看出原波形的轮廓,但若以 0 为判决电平,一些毛刺仍会在很多时刻影响判决,这些毛刺是高频的噪声。从频谱可以看出在 $f' = 0.25 \sim 0.3$ 处有较明显的噪声干扰,由于滤波器的阻带不可能增益为 0,所以未能消除,因此对其进行二次滤波(如图 9)。

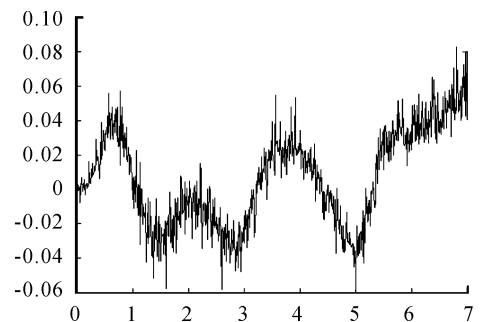


图 9 二次滤波后波形

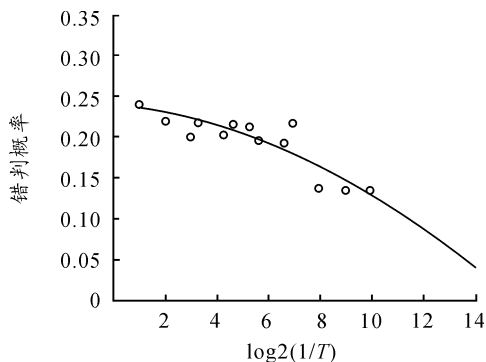


图 10 错判概率与 PN 码宽度的关系

经过二次滤波,如果设置 0 为判决电平,无误地恢复 +1、-1 的概率将增大。但仿真中的 PN 码速率不够高,不能有效地分散和滤除噪声的频谱。为了探究 PN 码速率和通信有效性的关系,选取码宽从 1 到 1/1000 的 14 组码宽,重复上述实验。由于噪声是随机的,每一判决时刻错判概率近似于一段时间出错的频率。因此用该时间段判决错误的频率为衡量标准,得到如图 10 所示并拟合曲线。

以上仿真实验可以得出:

1) 该实验是在频域较广的高斯白噪声下进行的,其它频域有限的干扰的频率会被更大地分散,通信质量会好于该实验。

2) 增加 PN 码速率可以降低误码率,但只有码速率有数量级的提高才能明显地降低误码。要保证可靠通信,必须满足 $T_c \ll T_a$ 。

3) 滤波器的性能非常重要。本实验中 35 阶滤波器的过

渡带过长,一次滤波的效果并不好,但多次滤波又使得信号能量降低,过高的阶次又会使接收有明显的延迟,因此要选用合适的滤波器。接收端信号功率小且含有杂波,可以接入小信号选频放大电路,进一步放大和选择信号。

4 结束语

扩频通信从编码的角度来看,是通过增加冗余而减少误码概率的,牺牲了有效性。本文选取了 DS 系统发送和接收过程,分析了两个过程中信号和噪声的带宽、信噪比的变化情况,并定性地给出了曲线图,说明了通信质量的改善。实际工程中为了增强有效性,常常从两个方面下手,一是设计性能更好的 PN 码,使选择的可能性增多,敌方干扰、破译的可能性降低;二是降低信息速率,可以采用线性预测编码、矢量量化编码等技术。扩频通信的前景非常广阔。

参考文献:

- [1] 沈连丰,叶芝慧. 信息论与编码[M]. 北京:科学出版社,2007.
- [2] 韦惠民. 扩频通信技术与应用[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2007.
- [3] 田日才. 扩频通信[M]. 北京:清华大学出版社,2007.
- [4] 樊昌信,张甫翊,徐炳祥,等. 通信原理[M]. 北京:国防工业出版社,2005.

(责任编辑 杨继森)

(上接第 75 页)

参考文献:

- [1] 申长宏. 机车齿轮箱箱体结构的优化设计[J]. 电力机车与城轨车辆,2007,30(3):37-38.
- [2] Tengjiao Lin, H. Ou, Runfang Li. A finite element method for 3D static and dynamic contact /impact analysis of gear drives[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering,2007,196(9-12):1716-1728.
- [3] Gynug Ju Kang, Jeong Kim, Beom Soo Kang, et al. Analysis

and design of pinion with inner helical gear by FEM[J]. International Journal of Modern Physics,2008,22(9,10,11):1859-1864.

- [4] Mohamed Slim Abbes, Slim Bouaziz, Fakhher Chaari, et al. An acoustic-structural interaction modelling for the evaluation of a gearbox-radiated noise[J]. International Journal of Mechanical Sciences,2008,50(3):569-577.
- [5] 张洪武,关振群,李云鹏,等. 有限元分析与 CAE 技术基础[M]. 北京:清华大学出版社,2004:112-115.

(责任编辑 杨继森)