

异步 DS-CDMA 最优混沌序列集的性能分析

李晓潮, 郭东辉, 吴伯信

(厦门大学物理系, 厦门 361005)



摘要: 为了获得异步 DS-CDMA 系统的最佳扩谱序列, 给出了一套用来选取混沌二值序列的优化准则。基于这一优化准则, 我们从 Chebyshev 映射生成的混沌序列中选取并构造出最优混沌二值序列集合。利用该集合作为异步 DS-CDMA 系统的扩谱序列, 所得到的系统仿真结果符合最佳扩谱序列的理论分析值, 因此可以被认为是异步 DS-CDMA 系统的一个最佳扩谱序列集合。

关键词: 混沌二值序列集; 异步码分多址; 最佳扩谱序列集; Chebyshev 映射

文章编号: 1004-731X (2005) 10-2508-04 **中图分类号:** TN929; O414 **文献标识码:** A

Analysis of Optimal Chaotic Binary Sequences in Asynchronous DS-CDMA

LI Xiao-chao, GUO Dong-hui, WU Bo-xi

(Phys. Department of Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: In order to generate the optimal spreading sequences for asynchronous DS-CDMA, some optimizing criteria for selecting chaotic binary sequence were proposed. In order to prove our analysis, these criteria on Chebyshev chaotic sequences were implemented to get the optimal chaotic binary sequences set. The agreement between theoretical analysis and simulation result shows this sequence set reaches the optimal performance and is suitable for asynchronous DS-CDMA.

Key words: Chaotic Binary Sequence Set; Asynchronous DS-CDMA; Optimal Spreading Sequence Set; Chebyshev Map

引言

近年来, 混沌扩谱作为扩谱通信的新兴研究方向得到广泛重视。其中一个重要的分支就是利用混沌序列的伪随机和数量多的特点, 取代扩谱通信中所采用的传统伪随机扩谱序列(如 m 序列和 Gold 序列等)^[1-3], 以解决传统序列组在数量、相关性和保密上的不足。从 80 年代末至今, 人们对利用 Tent 映射、Chebyshev 映射、Bernoulli 映射、Logistic 映射等混沌系统产生的各种混沌二值序列进行了大量研究^[4-5], 一致认为这些混沌序列具有和随机序列相似的特性, 即使是未经优化的混沌二值序列的周期相关性也优于传统的 m 序列。

在异步 DS-CDMA 系统中, 研究表明^[6-9]具有指数衰减非周期相关函数的序列集合才是系统所需要的最佳扩谱序列集。因此, 尽管 Gold 序列集的周期相关性相对于 Sidelnikov^[10]界限而言接近最优, 它也不是异步 DS-CDMA 系统所要求的最佳扩谱序列。基于指数衰减非周期相关的特殊要求, 人们利用各种混沌映射来生成与此要求相符的混沌序列集^[6-9,11], 并通过计算系统多址干扰量来表明最优混沌序列集的性能。然而, 各种文献中生成的混沌序列集有复数序列集、实数序列集和二值序列集, 它们相互混淆使得最终结果缺乏可比性, 并且混沌实数序列、复数序列和现有的数字 CDMA 通信系统并不兼容。同时, 混沌序列集的蒙特卡洛

(Monte Carlo) 仿真结果与理论值之间还存在着一些差异^[12,13], 从而使多址干扰计算、Monte Carlo 仿真和理论分析结果之间未能有效地相互印证。这些问题都成为混沌序列集进一步实用的障碍。为此, 本文在总结他人研究成果的基础上, 给出一套混沌序列合理选择的优化准则, 并依据此准则从 Chebyshev 映射生成的混沌序列中选择并构造出最优混沌二值序列集合。利用异步 DS-CDMA 的 Simulink 仿真系统, 我们对最优混沌二值序列集合的 Monte Carlo 仿真结果、理论分析和多址干扰计算结果之间进行比较, 表明该序列集符合异步 DS-CDMA 系统最佳扩谱序列集的理论要求, 并具有实用性。

为了阐述我们的研究成果, 在第 2 节中将简要分析异步 DS-CDMA 系统的信噪比公式, 并给出采用最佳扩谱序列时, 系统的多址干扰理论值; 比照这一结果在第 3 节中给出最优混沌二值序列的优化准则, 并根据优化准则给出基于 Chebyshev 映射的最优混沌二值序列集合; 然后, 在第 4 节中具体说明异步 DS-CDMA 系统的 Simulink 仿真模型, 并对系统 Monte Carlo 仿真结果、理论分析和多址干扰计算结果进行比较; 最后, 在结论一节中给予总结。

1 系统信噪比的原理分析

对于 K 个用户的异步 DS-CDMA 系统, 在高斯白噪声信道 (AWGN) 中, 各用户接收信号的信噪比为^[14]:

$$SNR_i = \left\{ \frac{1}{6N^3} \sum_{k=1, k \neq i}^K \{2C_k(0)C_i(0) + 4 \sum_{l=1}^{N-1} C_k(l)C_i(l) + \sum_{l=0}^{N-1} [C_k(l)C_i(l+1) + C_k(l+1)C_i(l)]\} + \frac{N_0}{2PT} \right\}^{-1/2} \quad (1)$$

收稿日期: 2004-10-08

修回日期: 2005-04-01

基金项目: 国家自然科学基金 (60076015); 福建省自然科学基金项目 (A0010019) 和福建省高新技术项目等。

作者简介: 李晓潮(1970-), 男, 福建福州人, 博士, 研究方向为神经网络及其应用, 扩谱通信, 嵌入式系统; 郭东辉, 教授, 博导, 研究方向为神经网络及其应用, 集成电路。

其中, N 是扩谱周期, C_k, C_i 是扩谱序列的非周期自相关函数, 高斯信道的白噪声功率为 $N_0/2$ 。上式中, 其他用户的干扰信号(即多址干扰)可以写成:

$$N_A^2 = \frac{1}{6N^3} \sum_{k=1, k \neq i}^K \{2C_k(0)C_i(0) + 4 \sum_{l=1}^{N-1} C_k(l)C_i(l) + \sum_{l=0}^{N-1} [C_k(l)C_i(l+1) + C_k(l+1)C_i(l)]\} \quad (2)$$

假设异步 DS-CDMA 系统所采用的扩谱序列集具有近似相等的归一化非周期相关函数(即 $C_i(l) \approx C_k(l) \approx C(l)$ 对所有 i, k, l 成立), 则(2)式最小化时^[9], $C(l)$ 满足:

$$C(l) = (-1)^l \frac{r^{l-N} - r^{N-l}}{r^{-N} - r^N}, \quad l=0,1,2,\dots,N-1, \quad r=2-\sqrt{3} \quad (3)$$

因此, 可以认为符合式(3)特性的扩谱序列集是异步 DS-CDMA 系统的最优扩谱序列集。对于采用最优扩谱序列集的异步 DS-CDMA 系统, 接收信号中的多址干扰项为:

$$N_{A-opt}^2 = \frac{\sqrt{3}(K-1)}{6N} \frac{r^{-2N} - r^{2N}}{r^{-2N} + r^{2N} - 2} \quad (4)$$

当 N 取较大值(例如 $N \geq 7$) 时, 有 $\frac{r^{-2N} - r^{2N}}{r^{-2N} + r^{2N} - 2} \approx 1$ 成立, 则:

$$N_{A-opt}^2 \approx \frac{\sqrt{3}(K-1)}{6N} = \frac{\sqrt{3}}{2} N_g \quad (5)$$

其中,

$$N_g = \frac{K-1}{3N} \quad (6)$$

它对应于采用随机或伪随机扩谱序列时系统多址干扰的统计平均值^[15]。

2 最优混沌二值序列集

为了和现有数字通讯系统兼容, 往往需要将混沌的实数序列转化成混沌二值序列。然而, 通常使用阈值函数变换方法^[2]所获得的混沌二值序列, 它的相关性能甚至不及于传统的伪随机序列。于是, 人们往往通过变化混沌系统初始值和分支参数的方法来产生大量的混沌二值序列, 再根据一定的规则来优化选择所需要的混沌二值序列^[11], 从而获得合乎需要的混沌二值序列集合。

下面将给出适用于异步 DS-CDMA 系统混沌二值序列的优化准则, 我们还是从式(2)所定义的多址干扰项入手, 并设 $C_i(l) \approx C_k(l) \approx C(l)$, 可以把式(2)改写为:

$$N_A^2 = \frac{1}{3N} \sum_{k=1, k \neq i}^K \left\{ \frac{C_k(0)C_i(0)}{C_k(0)^2} + \frac{2 \sum_{l=1}^{N-1} C_k(l)C_i(l)}{C_k(0)^2} + \frac{C_k(0)C_i(l) + C_k(l)C_i(0)}{2C_k(0)^2} + \frac{\sum_{l=1}^{N-1} [C_k(l)C_i(l+1) + C_k(l+1)C_i(l)]}{2C_k(0)^2} \right\} \quad (7)$$

$$= \frac{1}{3N} \sum_{k=1, k \neq i}^K \{1 + I_2 + I_3 + I_4\}$$

其中, $I_2 = \frac{2 \sum_{l=1}^{N-1} C^2(l)}{C(0)^2}$, $I_3 = \frac{C(l)}{C(0)}$, $I_4 = \frac{\sum_{l=1}^{N-1} [C(l)C(l+1) + C(l+1)C(l)]}{2C(0)^2}$, 且有^[16]: $I_2 = 2I_3^2 + O(I_3)$, $I_4 \ll I_3$ 。这样, 式(7)可以化简为:

$$N_A^2 \approx \frac{1}{3N} \sum_{k=1, k \neq i}^K \{1 + 2I_3^2 + I_3 + O(I_3)\} \quad (8)$$

当 $I_3 = -0.25$ 时上式有最小值, 此时多址干扰的最小值为 $0.875 \times \frac{K-1}{3N}$, 这一结果和(4)式近似相等。因此利用 $I_3 = \frac{C(l)}{C(0)}$ 作为

关键指标所选择生成的混沌二值序列应该具有和最优扩谱序列相近的多址干扰。

此外, 作为异步 DS-CDMA 系统的扩谱序列, 除了要降低多址干扰外, 还需要满足其它的要求, 如载波抑制制度, 序列同步等要求。其中, 扩谱序列的平衡性直接影响载波抑制制度^[17], 序列的周期自相关性对于码序列的同步和识别也是十分重要。另外在异步的环境中, 还要求扩谱序列集中的各个序列必须由不同的序列构成。基于这些考虑, 我们可以定义最优混沌二值序列集的优化准则如下:

- (1) 最小干扰准则: 各序列的归一化非周期自相关函数 $\frac{C(l)}{C(0)}$ 趋近 -0.25。
- (2) 平衡性准则: 即二进制序列中 ‘+1’ 和 ‘-1’ 的数目差趋于 1。
- (3) 相关性准则: 周期自相关函数旁瓣的取值小于 $t(n) = 1 + 2^{\lfloor (n+2)/2 \rfloor}$, 其中 n 为随机序列的阶数, $N = 2^n - 1$; 周期互相关函数的取值小于 1。

根据以上优化准则, 我们将以生成和测试序列长度为 63 的最优混沌二值序列集为例, 来验证我们提出优化准则的正确性和实用性。首先, 我们通过变换参数和初始值生成大量的 Chebyshev 混沌阈值序列; 然后, 设定最小干扰准则为 $-0.3 < \frac{C(l)}{C(0)} < -0.2$ 并按照优化准则从中选择最优混沌二值序列, 得到最后的序列集合是由 56 个序列组成, 序列的长度为 63。此序列集合的 $O(I_3)$ 均值为 -0.0171, 远小于值为 0.25 的 I_3 , 符合(7)式中忽略条件的要求。

3 系统仿真与结果分析

异步 DS-CDMA 系统的基本模块构成框图如图 1 所示, 它是由信源模块、扩谱模块、BPSK 调制模块、其他用户模块、AWGN 信道模块、解扩模块、BPSK 解调模块和信宿模块组成的。其中, 信源模块是一个 Bernoulli 随机数产生器, 它用来生成原始发送数据, 数据周期为 0.63 秒。扩谱模块是通过信源的发送数据和用户的扩谱序列的相乘运算来实现, 这里的扩谱序列长度为 63, 每切普(chip)的周期为 0.01 秒。扩谱后数据调制方式为 BPSK, 这里将 BPSK 调制模块

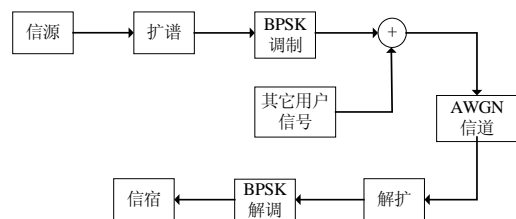


图 1 异步 DS-CDMA 系统的基本模块构成框图

的载波中心频率设为 500Hz, 初始相位设为 0。而其他用户模块是由多个用户子模块构成的, 每个用户子模块都包含信源模块、扩谱模块、BPSK 调制模块组成, 不同之处在于 BPSK 载波的初始相位、每个用户的扩谱序列及序列的初始相移, 它们是随机给定的。另外, 对其它用户 BPSK 调制后生成的载波信号, 在 [0 0.63]秒内随机延迟, 这种设置和序列的随机初始相移、BPSK 调制载波的随机初始相位共同构成异步 DS-CDMA 的仿真环境。图 2 给出用户信号扩谱后的 FFT 谱图。多用户信号叠加后经过 AWGN 信道后和所要接收用户的扩谱序列相乘, 来对接收信号进行解扩。图 3 给出解扩后用户接收信号的谱图, 这里 AWGN 信道的信噪比设为 $E_b/N_0 = 22dB$ 。解扩后的信号输入 BPSK 解调模块, 解调后的信号输入信宿模块。信宿模块则是由误码率计算模块构成, 它通过比较发射和接收到的数据来计算整个系统的误码率。图 4 给出了采用 Simulink 工具建立起来的异步 DS-CDMA 仿真系统图。

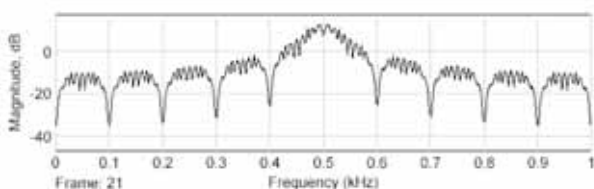


图 2 扩谱后单用户信号的频谱图

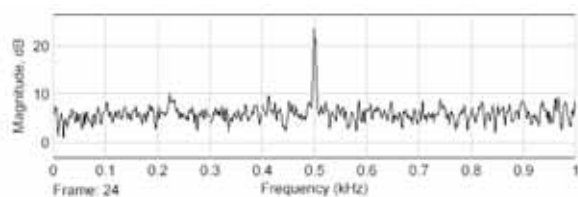


图 3 解扩后接收用户信号的频谱图

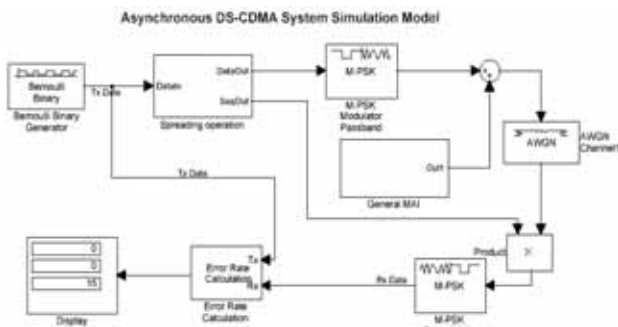


图 4 基于 Simulink 的异步 DS-CDMA 仿真系统

根据中心极限定理^[18], 可以认为异步 DS-CDMA 系统的总体噪声是服从高斯分布的随机变量, 因此, 系统的第 i 个接收用户的误码率 P_e 可表示为:

$$P_e = 1 - \Phi(SNR_i) \tag{9}$$

其中 Φ 是标准高斯分布函数。由于式(1)中的非周期自相关函数 C_i, C_i' 对于已知的扩谱序列是可计算的, 这样利用式(9)我们可以分别给出采用 Gold 序列集和最优混沌二值序列集的异步 DS-CDMA 系统误码率的数值计算结果, 分别如图 5

和图 6 中的 (—○—) 线和 (—+—) 线所示。同样, 采用 Monte Carlo 仿真方法, 经图 4 所示的 Simulink 系统仿真计算, 可以给出基于 Gold 序列集和最优混沌二值序列集的异步 DS-CDMA 系统误码率仿真结果, 分别如图 5 和图 6 中的 (—◇—) 线和 (—*—) 线所示。而基于伪随机序列和基于最优扩谱序列的异步 DS-CDMA 系统误码率的理论分析值分别可以由式(6)和式(5)结果来计算获得, 如图 5 和图 6 中的 (—□—) 线和 (—×—) 线所示。其中, 图 5 是当用户数为 25, 扩谱序列长为 63 时异步 DS-CDMA 系统误码率和 AWGN 信道信噪比 E_b/N_0 之间的关系曲线。可见, 基于最优混沌二值序列集的系统性能明显优于基于 Gold 序列集的系统性能, 几乎与理想的最优扩谱序列集的结果一致。当 E_b/N_0 小于 5dB 时, 信道中的高斯加性噪声对系统的影响占主导地位, 所以不同扩谱序列集合之间的误码率基本相同。而当 E_b/N_0 大于 10dB 时, 多址干扰成为系统中的主要干扰源, 能使多址干扰降至最低的基于最优混沌二值序列集的系统误码率要明显低于基于 Gold 序列集的系统误码率。

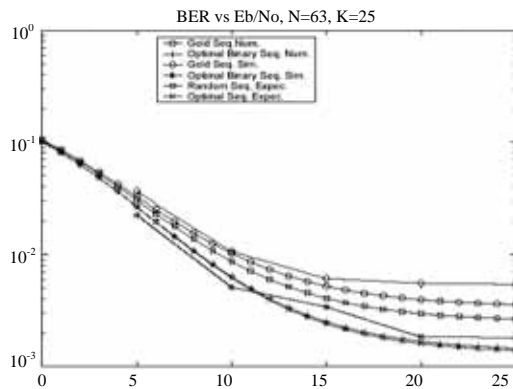


图 5 系统误码率和信道信噪比 E_b/N_0 关系图

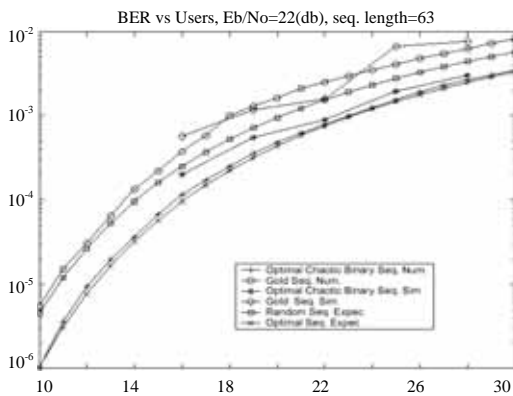


图 6 系统误码率和用户数之间的关系图

图 6 是当信噪比 $E_b/N_0 = 22dB$ 时异步 DS-CDMA 系统误码率和系统用户数之间的关系图, 其中横轴是系统用户数, 纵轴是系统误码率。可见, 总的来说, 采用最优混沌二值序列集的系统误码率低于采用 Gold 序列集的系统, 特别是当系统用户数增大时, 最优混沌二值序列集的系统性能越来越趋于理想的最优扩谱序列的结果。但是, 当用户数小于 20 时, 此时总体噪声是逐渐不再服从中心极限定理的高

斯分布假设, 因此利用公式(9) 得到的误码率和实际系统仿真得到的结果会有一定的偏差。

4 结论

从上面的系统仿真结果和理论分析结果上看, 根据我们的优化准则所选出来最优混沌二值序列可以用来充当异步 DS-CDMA 系统的最优扩谱序列。尽管我们的混沌二值序列目前是基于 Chebyshev 映射生成的, 且系统仿真是在高斯白噪声信道 (AWGN) 中进行的, 不过, 可以相信我们混沌序列的优化准则应该是普适的。有关其他混沌系统所产生的最优序列及在多径信道环境下的异步 DS-CDMA 系统性能, 我们还在进一步研究中。

参考文献:

[1] K Umeno, K Kitayama. Spreading Sequences Using Periodic Orbits of Chaos for CDMA [J]. Electronics Letters, 1999, 35(7): 545-546.

[2] T Kohda, A Tsuneda. Even and Odd Correlation Functions of Chaotic Chebyshev Bit Sequences for CDMA [J]. Proc. IEEE ISSSTA'94, 1994, 2: 391-395.

[3] 李晓潮, 郭东辉. 混沌扩谱 CDMA 的系统模型及其性能分析[J]. 电讯技术, 2003, 43(6): 13-18.

[4] Z Liu, J Tang, J Yu. An Application of Chaos: Generating Binary Pseudo-random Sequences [J]. Proc. ISCAS'88, 1988, 1: 1-3.

[5] T Kohda, A Tsuneda. Statistics of Chaotic Binary Sequences [J]. IEEE Trans. Inform. Theory, 1997, 43: 104-112.

[6] G Mazzini, R Rovatti, G Setti. Interference Minimization by Autocorrelation Shaping in Asynchronous DS-CDMA Systems: Chaos-based Spreading is Nearly Optimal [J]. Electron. Lett., 1999, 35(13): 1054-1055.

(上接第 2495 页)

有借鉴价值, 为提高射击密集度的提供了理论基础。

参考文献:

[1] 惠东. 长杆式尾翼稳定脱壳穿甲弹脱壳分析与计算[J]. 兵工学报弹箭分册, 1984, (3): 81-90.

[2] Dr. R. Cayzac1, Mr. E. Carette1, Pr. T. Alziary de Roquefort. Intermediate Ballistics Unsteady Sabot Separation: First Computations

(上接第 2499 页)

参考文献:

[1] 徐贤浩, 马士华. 供应链网络状结构模型中多级库存控制模型[J]. 华中理工大学学报, 1998, 26(7).

[2] Robert S. Kaplan, David P. Norton, the Balanced Scorecard-Measures That Drive Performance [J]. Harvard Business Review, 1992.

[3] 马士华, 李华焰, 林勇. 平衡记分法在供应链绩效评价中的应用研究 [EB/OL]. www.chinawuliu.com.cn/papers/content/ 2103-1-90.htm, 2002.

[4] 霍佳震, 隋明刚, 刘仲英. 企业绩效及供应链绩效评价研究现状 [J]. 同济大学学报, 2001.

[7] R Rovatti, G Mazzini. Interference in DS-CDMA Systems with Exponentially Vanishing Autocorrelations: Chaos-based Spreading is Optimal [J]. Electronics Letters, 1998, 34: 1911-1913.

[8] G Mazzini, G Setti, R Rovatti. Chaotic Complex Spreading Sequences for Asynchronous DS-CDMA - Part I: System Modeling and Results [J]. IEEE Trans., 1997, CASI-44, 937-947.

[9] C C Chen, K Yao, K Umeno, E Biglieri. Optimal Chaotic Spread Spectrum Sequences for Uplink CDMA Systems [J]. Proc. Of IEEE AS-SPCC, 2000, 135-140.

[10] D V Sarwate, M B Pursley. Crosscorrelation Properties of Pseudorandom and Related Sequences [J]. Proc. of the IEEE, 1980, 68(5): 593-619.

[11] 张琪, 郑君里. 异步码分多址通信中混沌扩频序列的选择[J]. 电子学报, 2001, 29(7): .865-867.

[12] F Agnelli, G Mazzini, R Rovatti, G Setti. A First Experimental Verification of Optimal MAI Reduction in Chaos-Based DS-CDMA Systems [J]. Proc. Of IEEE ISCAS'01, 2001, 3: 137-140.

[13] 张琪, 郑君里, 简相超. 采用混沌扩频序列的异步码分多址通信系统仿真[J]. 华大学学报 (自然科学版), 2002, 42(7): 901-904.

[14] M B Pursley. Performance evaluation for phase-coded spread-spectrum multiple-access communication-Part I: system analysis [J]. IEEE Trans. Commun., 1977, COM-25: 795-799.

[15] H F A Roefs, M B Pursley. Correlation Parameters of Random Sequences and Maximal Length Sequences for Spread-spectrum Multiple Access Communication [J]. IEEE Canadian Communications and Power Conference, 1976, 141-143.

[16] 贾占峰, 张琪, 郑君里. 异步码分多址通信中混沌扩频序列的研究 [J]. 清华大学学报 (自然科学版), 1999, 39(7): 111-115.

[17] 沈允春. 扩谱技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.

[18] 朱华, 黄辉宁, 李永庆, 梅文博. 随机信号分析[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1990.

and Validations, Dr. Iris Rose Crewther. 19th International Symposium on Ballistics [C], the 19th International Symposium on Ballistics, Interlaken, Switzerland, 2001. Switzerland: Printed by Vetter Druck AG, Thun/Switzerland, 2001, 297-305.

[3] 彼得·艾伯哈特, 胡斌. 现代接触动力学[M]. 南京: 东南大学出版社, 2003, 178-199.

[4] 李东旭. 逃逸飞行器分离动力学与仿真[M]. 北京: 科学出版社, 2003, 305-313.

[5] 邵晓峰, 季建华. 供应链竞争力评价指标体系研究[J]. 预测, 2000, (6).

[6] 丁以中. 管理科学—运用 Spreadsheet 建模和求解[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.

[7] 朱道立, 龚国华, 罗齐. 物流和供应链管理[M]. 上海: 复旦大学出版社, 2001.

[8] 王福保. 概率论及数理统计 (第三版) [M]. 上海: 同济大学出版社, 1994, 10.

[9] 马士华, 林勇, 陈志祥. 供应链管理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000, 10.

[10] Wayne L Winston, S Christian, Albright. Ractical Management Science: Spreadsheet Modeling and Applications [M]. Adsworth Publishing Company, 1997.