

直接序列扩频系统抗干扰能力研究

李振东*^① 谭维凤^② 康成斌^① 程竟爽^③

^①(中国空间技术研究院通信与导航卫星总体部 北京 100094)

^②(航天东方红卫星有限公司 北京 100094)

^③(北京空间飞行器总体设计部 北京 100094)

摘要: 在进行扩频系统设计时,有时需要分析系统的抗干扰能力,但现有的文献中关于直接序列扩频系统的宽带干扰能力、抗部分频带干扰能力说法不一致,提供的误比特率(BER)公式也互相不一致。该文通过理论推导给出了直接序列扩频系统在宽带干扰、部分频带干扰下更具一般意义的误比特率公式,并通过计算机仿真验证了该公式的正确性。最后利用该文给出的公式对直扩系统的性能随干扰频点、干扰带宽的变化趋势做了分析。

关键词: 直接序列扩频; 抗干扰; 误比特率; 误码率

中图分类号: TN911.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2021)01-0116-08

DOI: 10.11999/JEIT191007

Research on Anti-interference Ability of Direct Sequence Spread Spectrum System

LI Zhendong^① TAN Weifeng^② KANG Chengbin^① CHENG Jingshuang^③

^①(Institute of Telecommunication and Navigation Satellite, CAST, Beijing 100094, China)

^②(DFH Satellite Co., Ltd., Beijing 100094, China)

^③(Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China)

Abstract: When designing a spread spectrum system, it is sometimes necessary to analyze the anti-interference ability of the system. However, the existing literature on the anti-wideband interference capability and the ability to resist partial frequency band interference of the Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS) system are different, and the Bit Error Rate (BER) formulas provided are different, the general BER formula of direct sequence spread spectrum system under wideband interference and partial frequency band interference is given by theoretical derivation. The correctness of the formula is verified by computer simulation. Finally, the performance of the DSSS system with the interference frequency and the interference bandwidth is analyzed using the formula given in this paper.

Key words: Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS); Anti-interference; Bit Error Rate (BER); Symbol error rate

1 引言

在进行扩频系统设计时,有时需要分析系统的抗干扰能力,许多学者已给出扩频系统抗干扰能力的公式,如Sklar在文献[1]中给出了宽带干扰和脉冲干扰对直接序列扩频系统(简称直扩系统)误比特率的影响、部分频带干扰对跳频系统的误比特率影响;田日才等人在文献[2]中给出了广义平稳干扰和单载波干扰对系统处理增益的影响;沈允春、张邦宁等人、Peterson等人和Poisel分别在各自的著作[3-6]中给出了宽带干扰、部分频带干扰、单载波干扰对系统误比特率的影响。但现有文献有如下问

题:(1)部分文献,如文献[7-9]仅给出了干扰情况下的系统处理增益、干扰输出功率表达式、干扰对信道容量的影响,或者仅通过仿真说明了干扰对扩频系统性能的影响[9-12],或者对干扰抑制技术进行了研究[13,14],却未给出宽带或部分频带干扰下误比特率与 J/S (干信比)、 G_p (扩频增益)关系的公式,或者对扩频系统的信息序列估计进行了研究,却未涉及扩频系统的抗干扰性能[15,16];(2)在宽带干扰对直扩系统误比特率影响的表达形式上,有些文献认为 $W_{ss} = 2/T_c$ [17](其中 T_c 为扩频码片周期),有些文献认为 $W_{ss} = 1/T_c$ [1,18,19],从而得出了不同的结果;(3)对于部分频带干扰对直扩系统误比特率的影响,不同文献给出了不同的结果,大致分为两种观点(具体在后文展开),该两种观点互相矛盾。本文

收稿日期: 2019-12-18; 改回日期: 2020-11-15; 网络出版: 2020-11-19

*通信作者: 李振东 lizhendong.2009@163.com

对以上问题进行研究，给出宽带干扰、部分频带干扰以及单载波干扰情况下系统误比特率与 J/S , G_p 关系的公式，并利用本文给出的公式对直扩系统的误比特率随干扰频点、干扰带宽的变化情况进行了分析。

2 直扩系统数学模型

本文以BPSK直接序列扩频系统为例进行研究，其简化原理框图如图1和图2所示。

在讨论直扩系统的抗干扰性能时，假设系统已实现了载波精确同步，因而在接收信号表达式中不考虑传输时延和多普勒频移。

设进入接收机并通过射频滤波器后的信号为

$$r(t) = Ad(t)c(t)\cos(2\pi f_0t + \varphi_0) + N(t) + J(t) \quad (1)$$

其中， $d(t)$ 为信息码经过编码后的数字信号，等概率取 ± 1 值； $c(t)$ 为扩频码序列信号，取 ± 1 值； $c_r(t)$ 为接收机本地产生的扩频码序列信号，取 ± 1 值； A 为信号振幅； f_0 为载波频率，单位为Hz； φ_0 为随机相移，单位为rad； $N(t)$ 为热噪声； $J(t)$ 是进入接收机的干扰信号，设其为带通高斯白噪声，其可以表示为^[20]

$$J(t) = n_c(t)\cos(2\pi f_jt) - n_s(t)\sin(2\pi f_jt) \quad (2)$$

其中， $n_c(t)$ 为干扰信号的同相分量， $n_s(t)$ 为干扰信号的正交分量， f_j 为干扰信号中心频率。

$r(t)$ 的信号部分经过解扩解调输出为

$$\begin{aligned} & Ad(t)c(t)\cos(2\pi f_0t + \varphi_0)c(t)2\cos(2\pi f_0t + \varphi_0) \\ &= Ad(t)2 \cdot \frac{1 + \cos(4\pi f_0t + \varphi_0)}{2} \\ &= Ad(t) + Ad(t)\cos(4\pi f_0t + \varphi_0) \end{aligned} \quad (3)$$

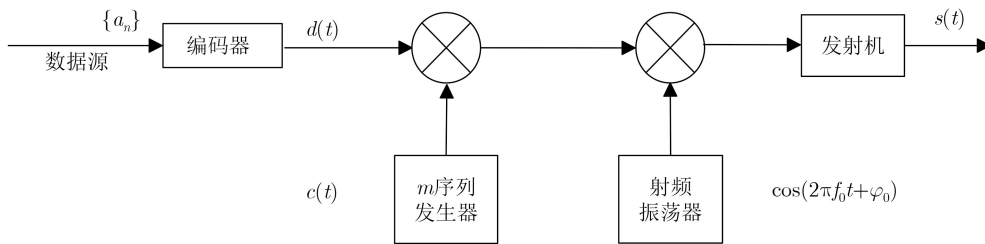


图1 直接序列扩频发射系统

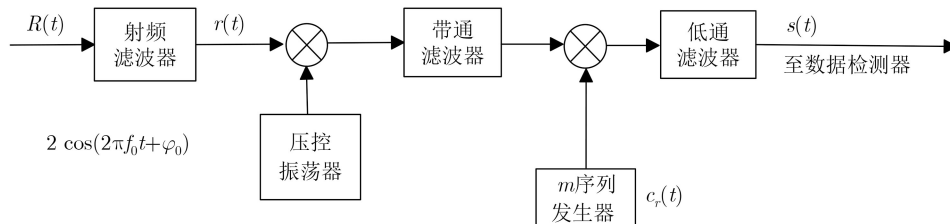


图2 直接序列扩频接收系统

式中，第2项是高频分量，经过低通滤波器后被滤除，数据信号 $Ad(t)$ 即被完整取出。

3 抗宽带干扰

当干扰布满整个扩频带宽 W_{ss} 时，如图3所示，此干扰称为宽带干扰，其中 $J(f)$ 为干扰信号的功率谱密度函数。

设宽带干扰功率为 J ，则干扰信号的单边功率谱密度为

$$J_0 = \frac{J}{W_{ss}} \quad (4)$$

假设系统采用BPSK相干解调、匹配滤波器判决，在无干扰时，系统的误比特率为

$$P_b = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right) \quad (5)$$

在考虑干扰对系统的影响时，可以将干扰视为对热噪声的叠加，即系统的误比特率为^[3-5]

$$\begin{aligned} P_b &= Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0 + J_0}}\right) = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0 + J/W_{ss}}}\right) \\ &= Q\left(\sqrt{\frac{\frac{2E_b/N_0}{1 + \frac{E_b}{N_0} \cdot \frac{J}{S} \cdot \frac{R_b}{W_{ss}}}}{1 + \frac{E_b}{N_0} \cdot \frac{J}{S} \cdot \frac{R_b}{W_{ss}}}}\right) \end{aligned} \quad (6)$$

式中， E_b 是单位码元能量， N_0 是热噪声单边功率谱密度， S 是信号功率， R_b 是信息速率， W_{ss} 是扩频带宽，Sklar^[1]和Poisel^[6]认为 $W_{ss} = R_b = 1/T_c$ ，其中 R_c 为扩频码片速率， T_c 是扩频码片周期，代入式(6)，从而得到^[1]

$$P_b = Q \left[\sqrt{\frac{2E_b/N_0}{1 + (E_b/N_0)(J/S)/G_p}} \right] \quad (7)$$

其中, $G_p = R_c/R_b$, 即扩频倍数, 也称扩频增益。笔者认为该结果存疑, 下面对其进行推导。

扩频码 $c(t)$ 为伪随机序列, 当码序列为无周期长码时, 其功率谱密度为^[2]

$$S_{c_r}(f) = T_c \left(\frac{\sin(\pi f T_c)}{\pi f T_c} \right)^2 = T_c \text{sinc}^2(f T_c) \quad (8)$$

图4是伪随机序列 $c(t)$ 功率谱示意图。

从图4中可以看出, 其功率谱第1个0点位于 $1/T_c$, T_c 是扩频码片周期。二进制基带信号 $d(t)$ 的功率谱与式(8)具有相同的表达形式, 只是将其中的 T_c 换成 T_b , 其中 T_b 是基带数据每比特所占时间, $d(t)$ 的功率谱第1个0点位于 $1/T_b$ 。时域相乘等效于功率谱卷积, 所以 $d(f)c(t)$ 功率谱的第1个0点位于 $1/T_c + 1/T_b$, 当 $T_b \gg T_c$ 时, $1/T_c + 1/T_b \approx 1/T_c$, $d(f)c(t)$ 乘以余弦信号进行频谱搬移后带宽不变, 所以扩频信号带宽即0点至0点带宽应为 $W_{ss} \approx 2/T_c = 2R_c$ (与文献[17]相同)。将 $W_{ss} \approx 2/T_c = 2R_c$ 代入式(6)得

$$P_b = Q \left[\sqrt{\frac{2E_b/N_0}{1 + (E_b/N_0)(J/S)/(2G_p)}} \right] \quad (9)$$

定义 J_0 为干扰信号的单边功率谱密度, J_0' 为干扰信号的双边功率谱密度, 则有 $J_0 = 2 \cdot J_0'$, 定义 $J_s = J_0 \cdot W_{ss}$ 为双边干扰功率, $J_d = J_0' \cdot W_{ss}$ 为单边干扰功率。则有 $J_d = 2 \cdot J_s$ 。

式(9)在 J 表示双边干扰功率时成立, 式(7)在 J 表示单边干扰功率时成立。式(7)和式(9)可统一表示为

$$P_b = Q \left[\sqrt{\frac{2E_b/N_0}{1 + (E_b/N_0)(J/S)/(kG_p)}} \right] \quad (10)$$

当干扰功率 J 取双边干扰功率时 $k=2$, 当 J 取单边干扰功率时 $k=1$ 。

4 部分频带干扰

当干扰信号功率谱覆盖部分扩频带宽时, 如图5所示, 该干扰称为部分频带干扰, 设其功率为 J , 且带宽为 W_j , 下面对部分频带干扰情况进行分析。

对于部分频带干扰, 沈允春在文献[3]中给出的误比特率公式为

$$P_b = Q \left[\sqrt{\frac{E_b}{N_0/2 + S(f_{IF})}} \right] \quad (11)$$

其中, $S(f_{IF})$ 表示干扰信号经过接收机解调解扩后的双边功率谱密度, 其值为

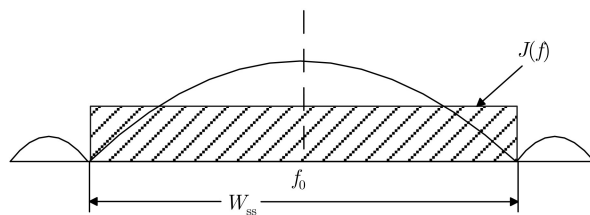


图3 宽带干扰示意图

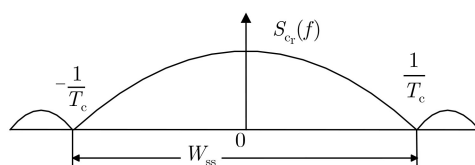


图4 伪随机序列的功率谱

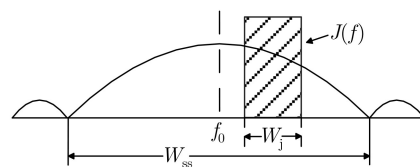


图5 部分频带干扰示意图

$$S(f_{IF}) = \frac{N'_j}{W_{ss}} \int_{f_j - w_j/2}^{f_j + w_j/2} \text{sinc}^2[(f_0 - f) 2/W_{ss}] df \quad (12)$$

其中, $N'_j = J/W_j$ 表示解调解扩前的干扰信号单边功率谱密度, f_j 表示干扰信号中心频点。

张邦宁等人在文献[4]中给出的误比特率公式为

$$P_b = \frac{1}{2} \text{erfc} \left(\frac{N_0}{E_b} + \frac{J}{S} \frac{b}{G_p} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (13)$$

其中

$$b = \frac{1}{W_j} \int_{f_j - w_j/2}^{f_j + w_j/2} \text{sinc}^2[(f_0 - f) T_c] df \quad (14)$$

Peterson等人在文献[5]中给出的误比特率公式为

$$P_b = Q \left[\sqrt{\frac{E_b}{N_0/2 + S(f_{IF})}} \right] \quad (15)$$

其中

$$S(f_{IF}) = \frac{N'_j}{W_{ss}} \int_{f_j - w_j/2}^{f_j + w_j/2} \text{sinc}^2[(f_0 - f) 2/W_{ss}] df \quad (16)$$

Poisel在文献[6]中给出的公式为

$$P_b = \frac{1}{2} \text{erfc} \left(\sqrt{\frac{E_b}{N_T}} \right) \quad (17)$$

其中, N_T 表示改进的噪声分量密度

$$\begin{aligned}
N_T &= N_0 + \frac{T_b}{G_p} \cdot \frac{J}{W_j} \int_{f_j-w_j/2}^{f_j+w_j/2} \sin^2 [(f_0 - f) T_c] df \\
&= N_0 + J T_c \cdot \frac{1}{W_j} \int_{f_j-w_j/2}^{f_j+w_j/2} \sin^2 [(f_0 - f) T_c] df
\end{aligned} \quad (18)$$

刘春玲等人在文献[17]中给出的公式为

$$P_b = Q \left(\sqrt{\frac{2}{\frac{N_0}{E_b} + \frac{2J \int_{f_j-w_j/2}^{f_j+w_j/2} \sin^2 \left[(f_0 - F) \frac{2}{W_{ss}} \right] dF}{S G_p W_j}}} \right) \quad (19)$$

康丽等人、孟向阳等人在文献[21,22]中给出的公式为

$$P_b = Q \left[\sqrt{\frac{2}{R_b N_0 / S + 2(J/S)(R_b / W_{ss})}} \right] \quad (20)$$

经进一步推导可发现，沈允春、张邦宁等人、Peterson等人，Poisel给出的公式是一致的，可以统一表示为

$$P_b = Q \left(\sqrt{\frac{2E_b/N_0}{1 + \frac{J}{S} \cdot \frac{E_b}{N_0} \cdot \frac{1}{G_p W_j} \int_{f_j-w_j/2}^{f_j+w_j/2} \sin^2 [(f_0 - F) T_c] dF}} \right) \quad (21)$$

$$J'(f_0) = T_c \int_{f_j-w_j/2}^{f_j+w_j/2} J(F) \sin^2 [(f_0 - F) T_c] dF = T_c \int_{f_j-w_j/2}^{f_j+w_j/2} \frac{J}{2W_j} \sin^2 [(f_0 - F) T_c] dF \quad (24)$$

系统解调输出误比特率公式为

$$\begin{aligned}
P_b &= Q \left(\sqrt{\frac{E_b}{\frac{N_0}{2} + J'(f_0)}} \right) = Q \left(\sqrt{\frac{2E_b/N_0}{1 + 2J'(f_0)/N_0}} \right) = Q \left(\sqrt{\frac{2E_b/N_0}{1 + \frac{2}{N_0} T_c \int_{f_j-w_j/2}^{f_j+w_j/2} \frac{J}{2W_j} \sin^2 [(f_0 - F) T_c] dF}} \right) \\
&= Q \left(\sqrt{\frac{2E_b/N_0}{1 + \frac{J}{S} \cdot \frac{E_b}{N_0} \cdot \frac{1}{G_p W_j} \int_{f_j-w_j/2}^{f_j+w_j/2} \sin^2 [(f_0 - F) T_c] dF}} \right) \quad (25)
\end{aligned}$$

式(25)与式(21)一致，其在 J 表示双边干扰功率时成立，式(22)在 J 表示单边干扰功率时成立(单边干扰功率、双边干扰功率的定义参见第2节)。式(25)和式(22)可统一表示为

刘春玲等人给出的公式可以整理为

$$P_b = Q \left(\sqrt{\frac{2E_b/N_0}{1 + \frac{J}{S} \cdot \frac{E_b}{N_0} \cdot \frac{2}{G_p W_j} \int_{f_j-w_j/2}^{f_j+w_j/2} \sin^2 [(f_0 - F) T_c] dF}} \right) \quad (22)$$

可以看出式(20)、式(21)和式(22)互相不一致，经过分析可知，式(20)根据其引用的文献[3]，其仅为 $W_j \ll W_{ss}$ 情况下的一种特例，而式(21)与式(22)又相互矛盾，本节对该问题进行研究，分析两公式的差异及原理。

式(1)中 $r(t)$ 的干扰信号部分 $J(t)$ 在接收端进行与 $c_r(t)$ 相乘解扩时，其功率谱密度函数 $J(F)$ 被 $c_r(t)$ 的功率谱 $S_{C_r}(f)$ 卷积^[2]，功率谱被展宽，即解扩输出干扰双边功率谱密度为

$$\begin{aligned}
J'(f) &= J(f) * S_{C_r}(f) \\
&= \int_{-\infty}^{\infty} J(F) T_c \sin^2 [(f - F) T_c] dF \\
&= T_c \int_{f_j-w_j/2}^{f_j+w_j/2} J(F) \sin^2 [(f - F) T_c] dF \quad (23)
\end{aligned}$$

卷积过程如图6所示，卷积结果如图7所示。

用 $D(f)$ 表示基带数据信号 $d(f)$ 的功率谱密度函数，则解扩输出和带通滤波后， $r(t)$ 的信号部分功率谱被变换为 $f_0 \pm B/2$ 范围内的窄带信号 $(A^2/2)D(f \pm f_0)$ ，其中 B 为带通滤波器带宽，当 $B/2 \ll R_c$ 时，频带 B 内的干扰功率谱密度 $J(f) * S_{C_r}(f)$ 可近似视为平坦的，近似为 f_0 处的双边功率谱密度

$$P_b = Q \left(\sqrt{\frac{2E_b/N_0}{1 + \frac{J}{S} \cdot \frac{E_b}{N_0} \cdot \frac{k}{G_p W_j} \int_{f_j - W_j/2}^{f_j + W_j/2} \text{sinc}^2[(f_0 - F) T_c] dF}} \right) \quad (26)$$

当干扰功率 J 取双边干扰功率时 $k = 1$ ，当 J 取单边干扰功率时 $k = 2$ 。

当 $W_j = W_{ss}$ ， $f_j = f_0$ 时，即为宽带干扰情况，此时式(26)中积分结果为

$$\begin{aligned} & \int_{f_j - W_j/2}^{f_j + W_j/2} \text{sinc}^2[(f_0 - F) T_c] dF \\ &= \int_{f_0 - W_{ss}/2}^{f_0 + W_{ss}/2} \text{sinc}^2[(f_0 - F) T_c] dF \\ &= \int_{f_0 - 1/T_c}^{f_0 + 1/T_c} \text{sinc}^2[(f_0 - F) T_c] dF \\ &\approx \int_{-\infty}^{\infty} \text{sinc}^2[(f_0 - F) T_c] dF \\ &= \frac{1}{T_c} \int_{-\infty}^{\infty} \text{sinc}^2[(f_0 - F) T_c] d(T_c F) \\ &= \frac{1}{T_c} = R_c = \frac{W_{ss}}{2} \end{aligned} \quad (27)$$

式(27)中从第3步开始取了近似，用 $\text{sinc}^2(f)$ 函数在正负无穷上的积分值代替其主瓣积分值。

代入式(26)，得

$$P_b = Q \left[\sqrt{\frac{2E_b/N_0}{1 + (E_b/N_0)(J/S)/(2G_p)}} \right] \quad (28)$$

可见式(28)与式(9)相同。

5 抗单载波干扰

当 $W_j \rightarrow 0$ 时，即为单载波干扰，对式(26)中的

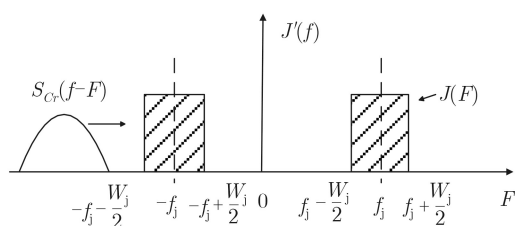


图6 $J(f)$ 与 $S_{cr}(f)$ 卷积过程示意图

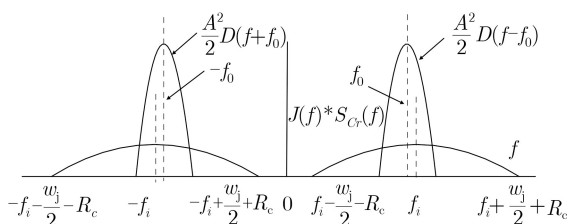


图7 $J(f)$ 与 $S_{cr}(f)$ 卷积结果示意图

W_j 取 $W_j \rightarrow 0$ 极限， J 取双边干扰功率，即可得到单载波干扰情况下的误比特率，当 $f_j = f_0$ 时，单载波干扰情况下的误比特率为

$$P_b = Q \left(\sqrt{\frac{2E_b/N_0}{1 + \frac{J}{S} \frac{E_b}{N_0} \frac{1}{G_p} \lim_{W_j \rightarrow 0} \frac{1}{W_j} \int_{f_j - W_j/2}^{f_j + W_j/2} \text{sinc}^2[(f_0 - F) T_c] dF}} \right) = Q \left[\sqrt{\frac{2E_b/N_0}{1 + (E_b/N_0)(J/S)/G_p}} \right] \quad (29)$$

式(29)与文献[3-6]中窄带干扰 $W_j \ll W_{ss}$ 情况时的结果相同，即文献中常用单载波干扰来等效极窄带干扰。

6 仿真实验

为了验证本文的推导，用计算机编程进行蒙特卡罗仿真。按照图1、图2建立仿真数学模型。仿真参数选取为：载波频率 $f_0 = 2$ MHz，信息速率 $R_b = 5000$ bps，扩频码片速率 $R_c = 1$ Mcps，采样频率 $f_s = 2(f_0 + R_b)$ ，干信比 $J/S = 20$ dB，信号功率 0.5 mW，双边干扰功率 50 mW，仿真 10^4 bit情况下的误比特率。

6.1 宽带干扰仿真

用带通高斯白噪声对宽带干扰的情况进行了仿真， E_b/N_0 取 2 dB，仿真结果如图8所示。

从图中可以看出，仿真结果与式(9)的计算结果更为接近，几乎重合，而与式(7)相去甚远，证明 J 取双边干扰功率情况下，宽带干扰情况下正确的误比特率计算公式是式(9)。

6.2 部分频带干扰仿真

用带通高斯白噪声对部分频带干扰的情况进行了仿真， E_b/N_0 取 0 dB，干扰中心频点设置为 $f_j = 2$ MHz，干扰带宽设置为 $W_j = 2 \times 10^5$ Hz， J 取双边干扰功率，仿真结果如图9所示。

从图中可以看出，仿真结果与式(21)计算结果更为接近，几乎重合，而与式(22)相去甚远，证明 J 取双边干扰功率情况下，部分频带干扰情况下正确的误比特率公式是式(21)。

7 直扩系统抗部分频带干扰分析

利用式(26)，可以对不同干扰频率、不同带宽

的部分频带干扰情况下，直扩系统的误比特性能变化趋势进行分析。假设系统采用与第5节同样的参数， $E_b/N_0=0$ dB，干扰带宽 $W_j = 2 \times 10^5$ Hz， J 取双边干扰功率，利用式(26)进行数值计算，则系统误比特率随干扰频点的变化情况如图10所示。从图中可以看出，当干扰中心频点从扩频信号频率下限向载波频率运动过程中，误比特率逐渐增大，到载波频率时，误比特率最大，从载波频率向扩频信号频率上限运动过程中，误比特率逐渐减小。

对于干扰信号中心频点位于载波频点 f_0 、干扰带宽从 $10\%W_{ss} \sim 100\%W_{ss}$ 变化时，误比特率变化趋势如图11所示，从图中可以看出，在干扰频点、干信比不变的情况下，随着干扰带宽的加大，误比特率逐渐减小，系统抗干扰能力逐渐变强，当带宽趋于零时，即单载波情况下系统抗干扰能力最差。

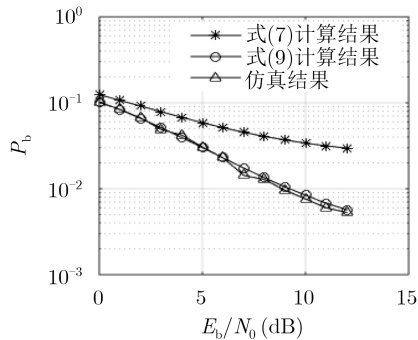


图8 宽带干扰仿真结果

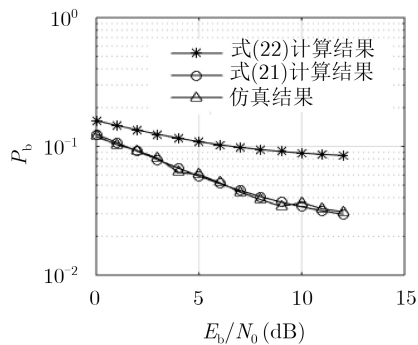


图9 部分频带干扰仿真结果

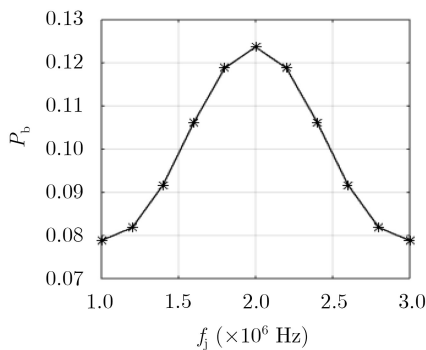


图10 不同干扰频点对应的误比特率

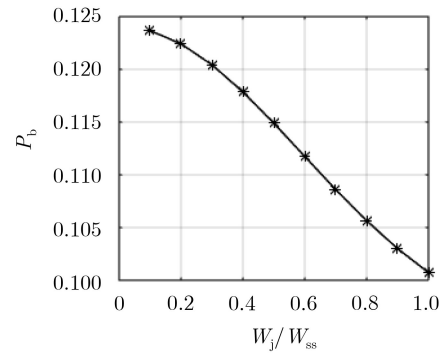


图11 不同干扰带宽对应的误比特率

8 结束语

本文对直接序列扩频系统的抗干扰性能进行了研究，推导了一般情况下宽带干扰、部分频带干扰的误比特率与 G_p 关系的公式，用计算机编程搭建了仿真系统，通过仿真验证了该组公式的正确性，并基于推导出来的部分频带干扰公式，对直扩系统在不同干扰频点、不同干扰带宽的部分频带干扰情况下的误比特率性能变化趋势进行了分析。

本文推导的公式对工程中直扩系统的抗干扰性能评估具有指导意义。后续可以此为基础，对如何提高直扩系统的抗干扰性能进行研究。

参考文献

- [1] SKLAR B. Digital Communications: Fundamentals and Applications[M]. 2nd ed. Upper Saddle River, US: Prentice-Hall, Inc., 2001: 735-765.
- [2] 田日才, 迟永钢. 扩频通信[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2014: 30-36.
TIAN Ricai and CHI Yonggang. Spread Spectrum Communication[M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2014: 30-36.
- [3] 沈允春. 扩谱技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995: 236-244.
SHEN Yunchun. Spread Spectrum Technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1995: 236-244.
- [4] 张邦宁, 魏安全, 郭道省. 通信抗干扰技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 54-59.
ZHANG Bangning, WEI Anquan, and GUO Daosheng. Communication anti-Interference Technology[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2006: 54-59.
- [5] PETERSON R L, ZIEMER R E, and BORTH D E. Introduction to Spread-Spectrum Communications[M]. Englewood Cliffs, US: Prentice Hall, 1995: 327-354.
- [6] POISEL R A, 楼才义, 王国宏, 张春磊, 等译. 现代通信干扰原理与技术[M]. 2版. 北京: 电子工业出版社, 2014: 334-338.
POISEL R A, LOU Caiyi, WANG Guohong, ZHANG Chunglei, et al. translation. Modern Communications Jamming Principles and Techniques[M]. 2nd ed. Beijing:

- Publishing House of Electronics Industry, 2014: 334–338.
- [7] 白春惠. 直接序列扩频通信抗干扰能力研究[J]. 舰船电子工程, 2019, 39(4): 55–58. doi: [10.3969/j.issn.1672-9730.2019.04.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-9730.2019.04.012).
- BAI Chunhui. Research for anti-jamming capability of direct sequence spread spectrum communications[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2019, 39(4): 55–58. doi: [10.3969/j.issn.1672-9730.2019.04.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-9730.2019.04.012).
- [8] 石荣, 杜宇. 从香农公式再看直扩通信与通信干扰之间的博弈[J]. 通信技术, 2019, 52(4): 782–788. doi: [10.3969/j.issn.1002-0802.2019.04.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-0802.2019.04.002).
- SHI Rong and DU Yu. Viewing again on the game between DSSS communication and jamming from Shannon formula[J]. *Communications Technology*, 2019, 52(4): 782–788. doi: [10.3969/j.issn.1002-0802.2019.04.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-0802.2019.04.002).
- [9] TIKHOMIROV A, OMELVANCHUK E, and SEMENOVA A. Direct sequence spread spectrum system noise and interference immunity analysis[C]. 2018 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS), Kazan, Russia, 2018: 1–6. doi: [10.1109/EWDTS.2018.8524661](https://doi.org/10.1109/EWDTS.2018.8524661).
- [10] MUNIR M A and MAUD A R M. Direct-sequence spread spectrum with variable spreading sequence for jamming immunity[C]. The 16th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST), Islamabad, Pakistan, 2019: 933–937. doi: [10.1109/IBCAST.2019.8667119](https://doi.org/10.1109/IBCAST.2019.8667119).
- [11] ALAGIL A, ALOTAIBI M, and LIU Yao. Randomized positioning DSSS for anti-jamming wireless communications[C]. 2016 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC), Kauai, USA, 2016: 1–6. doi: [10.1109/ICNC.2016.7440626](https://doi.org/10.1109/ICNC.2016.7440626).
- [12] MA Lu, FAN Cheng, and SUN Wei. Comparison of jamming methods for underwater acoustic DSSS communication systems[C]. The 2nd IEEE Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC), Xi'an, China 2018: 1340–1344. doi: [10.1109/IMCEC.2018.8469430](https://doi.org/10.1109/IMCEC.2018.8469430).
- [13] 杨义鹏. 扩频通信窄带干扰抑制技术的思考[J]. 数字通信世界, 2018(2): 265. doi: [10.3969/J.ISSN.1672-7274.2018.02.215](https://doi.org/10.3969/J.ISSN.1672-7274.2018.02.215).
- YANG Yipeng. Thoughts on narrowband interference suppression technology for spread spectrum communication[J]. *Digital Communication World*, 2018(2): 265. doi: [10.3969/J.ISSN.1672-7274.2018.02.215](https://doi.org/10.3969/J.ISSN.1672-7274.2018.02.215).
- [14] 谭维凤, 王雪宾, 窦骄. 一种提高卫星扩频测控链路抗干扰能力的方法[J]. 通信技术, 2018, 51(12): 2836–2840. doi: [10.3969/j.issn.1002-0802.2018.12.009](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-0802.2018.12.009).
- TAN Weifeng, WANG Xuebin, and DOU Jiao. Method for improving anti-jamming capacity of satellite direct spread spectrum TT&C systems[J]. *Communications Technology*, 2018, 51(12): 2836–2840. doi: [10.3969/j.issn.1002-0802.2018.12.009](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-0802.2018.12.009).
- [15] 周杨, 张天骐. 同/异步短码DS-CDMA信号伪码序列及信息序列盲估计[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(7): 1540–1547. doi: [10.11999/JEIT180812](https://doi.org/10.11999/JEIT180812).
- ZHOU Yang and ZHANG Tianqi. Blind estimation of the pseudo noise sequence and information sequence for short code synchronous and asynchronous DS-CDMA signal[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(7): 1540–1547. doi: [10.11999/JEIT180812](https://doi.org/10.11999/JEIT180812).
- [16] 钟兆根, 于柯远, 孙雪丽. 基于序贯蒙特卡罗的非同步长码DS-CDMA信号扩频码及信息序列联合估计[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(6): 1365–1373. doi: [10.11999/JEIT180157](https://doi.org/10.11999/JEIT180157).
- ZHONG Zhaogen, YU Keyuan, and SUN Xueli. Joint estimation of spreading codes and information sequences for asynchronous Long Code DS-CDMA signals based on sequential Monte Carlo[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(6): 1365–1373. doi: [10.11999/JEIT180157](https://doi.org/10.11999/JEIT180157).
- [17] 刘春玲, 张自豪. 北斗接收机在干扰下的性能研究[J]. 计算机科学, 2017, 44(2): 163–166, 170. doi: [10.11896/j.issn.1002-137X.2017.02.025](https://doi.org/10.11896/j.issn.1002-137X.2017.02.025).
- LIU Chunling, and ZHANG Zihao. Performance analysis of Beidou receiver under interference[J]. *Computer Science*, 2017, 44(2): 163–166, 170. doi: [10.11896/j.issn.1002-137X.2017.02.025](https://doi.org/10.11896/j.issn.1002-137X.2017.02.025).
- [18] LAKSHMI M L S N S, ANUDEEPSAGAR K, and NIRANJANPRASAD. Analysis of DSSS performance under communication-jamming environment[C]. 2014 International Conference on Electronics and Communication Systems (ICECS), Coimbatore, India, 2014: 1–8. doi: [10.1109/ECS.2014.6892570](https://doi.org/10.1109/ECS.2014.6892570).
- [19] 蔡城鑫, 施白雪, 徐慨. 单音及部分频带干扰下DSSS系统性能分析[J]. 航天电子对抗, 2019, 35(4): 35–39. doi: [10.3969/j.issn.1673-2421.2019.04.009](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-2421.2019.04.009).
- CAI Chengxin, SHI Baixue, and XU Kai. Performance analysis of DSSS system under mono and partial band interference[J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2019, 35(4): 35–39. doi: [10.3969/j.issn.1673-2421.2019.04.009](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-2421.2019.04.009).
- [20] 李晓峰, 周宁, 周亮. 通信原理[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2014: 54–55.
- LI Xiaofeng, ZHOU Ning, and ZHOU Liang. *Communication Principle*[M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2014: 54–55.
- [21] 康丽, 邵玉斌. 直接序列扩频系统抗干扰性能研究[J]. 赣南师范学院学报, 2006, 27(6): 55–57. doi: [10.3969/j.issn.1004-8332.2006.06.017](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-8332.2006.06.017).
- KANG Li and SHAO Yubin. Research on anti-jamming function of direct sequence spread spectrum (DSSS)

- system[J]. *Journal of Gannan Normal University*, 2006, 27(6): 55–57. doi: [10.3969/j.issn.1004-8332.2006.06.017](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-8332.2006.06.017).
- [22] 孟向阳, 刘明洋, 王晓婷. 干扰抑制技术辅助的直扩系统抗窄带干扰特性研究[J]. *空间电子技术*, 2019, 16(4): 44–49. doi: [10.3969/j.issn.1674-7135.2019.04.009](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-7135.2019.04.009).
- MENG Xiangyang, LIU Mingyang, and WANG Xiaoting. Research on narrow band interference resistance of DSSS system assisted by interference suppression technology[J]. *Space Electronic Technology*, 2019, 16(4): 44–49. doi: [10.3969/j.issn.1674-7135.2019.04.009](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-7135.2019.04.009).
- 李振东: 男, 1983年生, 工程师, 硕士, 研究方向为卫星微波通信、航天器电子与信息系统.
- 谭维凤: 女, 1984年生, 工程师, 硕士, 研究方向为卫星测控系统、扩频通信.
- 康成斌: 男, 1983年生, 高级工程师, 博士, 研究方向为卫星星间链路、微波通信.
- 程竟爽: 男, 1989年生, 工程师, 博士, 研究方向为航天器总体设计.

责任编辑: 余蓉