

多频带干扰对超宽带调制技术性能的影响分析

蒋磊^{1,2}, 王永生¹, 程韧²

(1. 西北工业大学电子信息学院, 陕西西安 710072; 2. 空军工程大学电讯工程学院, 陕西西安 710077)

摘要: 研究了多频带干扰对超宽带调制技术性能的影响。在高斯脉冲波形的条件下, 推导得出了超宽带调制技术抗多频带干扰能力指标的数学表达式。在多频带干扰下, 分别对超宽带调制技术、直接序列扩频调制技术和跳频调制技术进行了抗干扰性能比较分析和性能仿真。分析和仿真结果表明, 在大多数的情况下, 超宽带调制技术抗多个频带干扰的能力明显优于直接序列扩频调制技术和跳频调制技术。

关键词: 超宽带; 抗干扰; 直接序列扩频; 跳频

中图分类号: TN914.5 文献标识码: A 文章编号: 1009-3516(2005)04-0044-05

由于超宽带调制技术(UWB)固有的 LPI 和 LPD 特性, 近年来, UWB 被广泛地应用于军事通信领域中。文献[1]已经对 UWB 应用于长距离的通信链, 尤其是在无人机(UAV)中的应用进行了考虑。IAI 和 Time Domain 公司以及 AATD 协会已经开始研发无人机的超宽带(UAV-UWB)通信链, 并且 DARPA 把 UAV-UWB 通信链作为构建其网络中心战的一个重要部分进行研究。

由于 UWB 所占用的频带基本覆盖了现行的各种通信系统所使用的频带, 这必然会对已经存在的各种通信系统产生影响。UWB 在干扰现行通信系统的同时, 也同样受到各种干扰的威胁, 对 UWB 抗各种干扰的能力分析对其实际的应用具有重要意义。文献[2]从频域的角度对 UWB 抗单频干扰、部分频带干扰和阻塞干扰的性能进行了分析, 但没有给出与扩频调制技术的性能比较。文献[3]进行了 UWB 抗单个频带干扰的能力分析, 但没有给出其与跳频通信系统的抗干扰性能比较。本文从抗干扰的角度出发, 对 UWB 抗多个频带干扰的能力进行了数学分析, 并与直接序列扩频方式(DS-SS)和跳频方式(FH-SS)进行了性能比较。分析和仿真结果表明, 在大多数的情况下, UWB 抗多个频带干扰的能力明显优于 DS-SS 和 FH-SS。

1 信号模型

1.1 干扰信号模型

干扰信号 $J(t)$ 为多个频带干扰, 各干扰信号频带的中心频率为: $f_{j1}, f_{j2} \cdots f_{jn}$, 各频带干扰假设为零均值连续时间的广义平稳随机过程, 带宽分别为: $B_{j1}, B_{j2} \cdots B_{jn}$, 多频带干扰功率谱密度表达式为:

$$S_j(f) = \sum_{k=1}^n S_{jk}(f) \quad (1)$$

上式中, $S_{jk}(f) = \begin{cases} \frac{J_k}{2} & |f - f_{jk}| \leq B_{jk}/2 \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$, 其功率谱密度如图 1 所示, 干扰信号的自相关函数为:

$$R_j(\tau) = \sum_{k=1}^n J_k \frac{\sin(\pi B_{jk} \tau)}{\pi \tau} \cos(2\pi f_{jk} \tau) \quad (2)$$

收稿日期: 2005-01-07

基金项目: 国防“973”计划研究基金资助项目

作者简介: 蒋磊(1974-), 男, 江苏无锡人, 讲师, 博士生, 主要从事 UWB 技术研究;

王永生(1941-), 男, 陕西西安人, 教授, 博士生导师, 主要从事航空通信系统技术研究。

1.2 UWB 发射与接收处理

UWB 信号实质是一个极窄的脉冲串,信息的调制通常采用 BPM、PAM 和 PPM 方式,本文采用 2-PPM 调制,2-PPM 结合跳时码调制的单用户超宽带 (TH-PPM) 信号可表示为^[4]

$$S_T(t) = \sum_{j=-\infty}^{j=+\infty} \sqrt{E_p} W(t - jT_f - c_j T_c - \delta d_{[j/N_s]}) \quad (3)$$

上式中: E_p 为单个脉冲的能量、 T_f 为脉冲的平均重复时间、 c_j 是跳时码中的第 j 个码、 T_c 是跳时码的单位时移、 $c_j T_c$ 是跳时码对第 j 个脉冲的附加时移、 δ 为 2-PPM 的调制指数、 $d_{[j/N_s]} \in \{0,1\}$ 是待发送的二进制信息数据、 N_s 为每个信息比特含有的脉冲数、 $[j/N_s]$ 为取整运算; $W(t)$ 代表发射的极窄脉冲波形,一般可取 Gaussian 形和 Rayleigh 形,由于 Gaussian 形脉冲有接近于零的直流分量,便于天线发射,因此本文采用前者,Gaussian 形脉冲的函数表达式为^[3]

$$W_c(t) = A_c [1 - (\frac{t}{\sigma} - 3.5)^2] \exp[-0.5(\frac{t}{\sigma} - 3.5)^2] \quad (4)$$

式(4)中,幅度 A_c 的取值应使该脉冲具有单位能量;该 Gaussian 形脉冲的时间宽度 $T_p = 7\sigma$ (该时长的脉冲能量占有总能量的 99.99%),取 -3 dB 带宽作为 Gaussian 形脉冲的有效带宽, $B_{-3dB} = 0.1853/\sigma$ 。

UWB 的解调使用脉冲相关接收原理,将接收信号与本地模板信号进行相关处理。针对 2-PPM 的本地模板信号为

$$V(t) = W(t) - W(t - \delta) \quad (5)$$

设接收的信号为:

$$Y(t) = S_T(t) + J(t) \quad (6)$$

式(6)中 t 为接收的 UWB 有用信号, $J(t)$ 为干扰信号,则相关处理的判决量为

$$D_{\text{data}} = \sum_{j=0}^{N_s-1} \int_{\tau+jT_f}^{\tau+(j+1)T_f} Y(t) V(t - jT_f - c_j T_c - \tau) dt \quad (7)$$

假设接收机定时没有偏移,即 $\tau = 0$,则可通过下式进行信息数据的恢复。

$$d_{\text{data}} = \begin{cases} 0, & D_{\text{data}} \geq 0 \\ 1, & D_{\text{data}} < 0 \end{cases} \quad (8)$$

为了使分析 UWB 的抗干扰特性的过程变的简化,不失一般性,作如下假设:

- 1) UWB 调制不采用跳时码,即 $c_j = 0$;
- 2) 2-PPM 调制指数 $\delta = T_p$;
- 3) 每个信息比特只含有 1 个脉冲,即 $T_f = T_b$, (T_b 为传输 1 比特信息所占用的时长)。

在 1 个信息比特间隔内,即: $jT_b \leq t \leq (j+1)T_b$,接收的信号为: $Y_j(t) = \sqrt{E_p} W(t - jT_f - dT_p) + J(t)$, 由于 $\int_0^{T_f} W(t)^2 dt = 1$,根据 UWB 的相关接收原理,从式(5)中可以得到相关处理单元给出的关于第 j 个信息比特的判决量为

$$D_{j\text{data}} = \pm \sqrt{E_p} + Jam(jT_b) \quad (9)$$

$$Jam(jT_b) = \int_0^{T_f} J(t + jT_f) V(t) dt \quad (10)$$

设干扰信号平均功率为 P_j ,UWB 信号的平均功率为 $P_s = E_p/T_b$,则输入的信干比为: $SIR_{\text{in}} = \frac{E_p}{T_b P_j}$,

从式(9)中可以看出,相关处理后的信干比 $SIR_{\text{out}} = \frac{E_p}{E[Jam^2(jT_b)]}$,其中:

$$E[Jam^2(jT_b)] = \int_0^{T_f} \int_0^{T_f} R_j(t_1 - t_2) V(t_1) V(t_2) dt_1 dt_2 \quad (11)$$

$$\text{则 UWB 调制的处理增益} \quad G_{\text{vwb}} = \frac{T_b P_j}{E[Jam^2(jT_b)]} \quad (12)$$

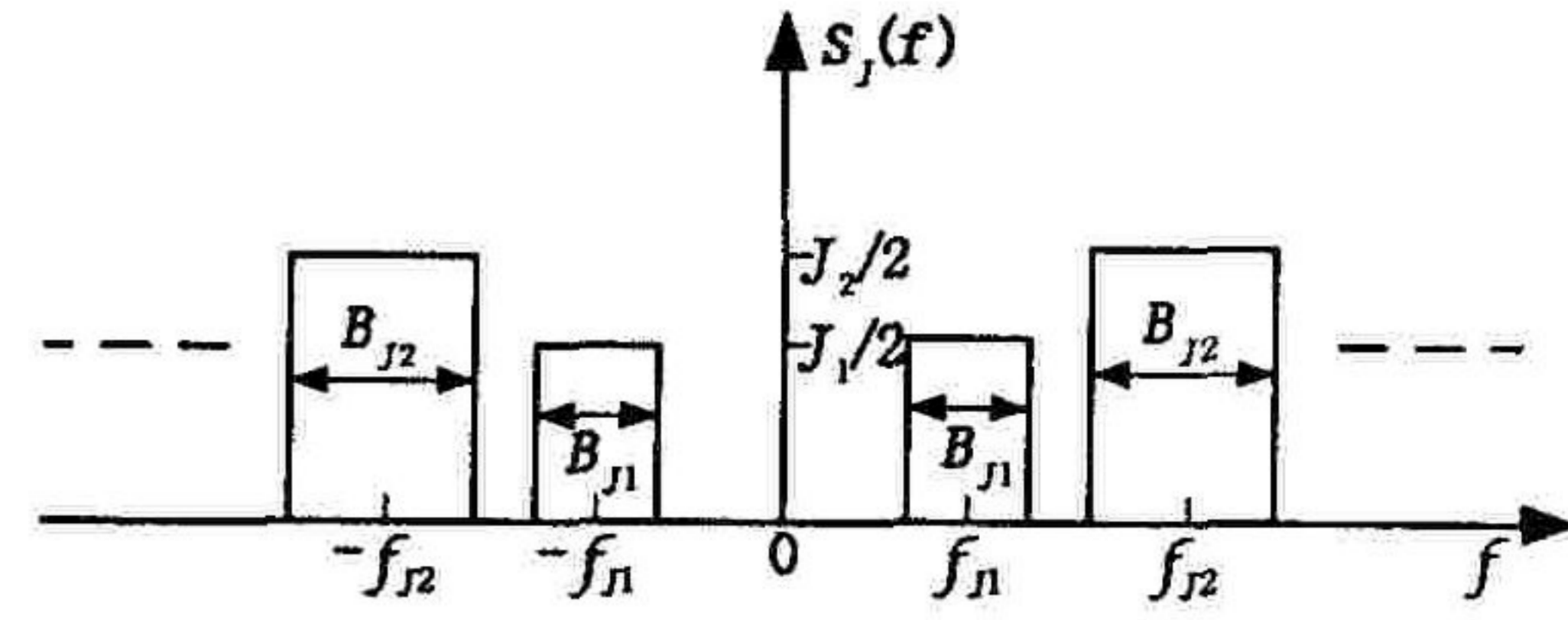


图1 干扰信号的功率谱密度分布示意图

2 抗干扰性能分析

2.1 UWB 抗多个频带干扰性能分析

这里引入指标 JR 来描述系统的抗干扰能力, $JR = G - SIR_D$, SIR_D 为满足系统要求所需的最小信干比值(本文取 $10 \text{ dB}^{[3]}$)。将式(2)代入式(11)可得:

$$E[J_{am}^2(jT_b)] = \int_0^{T_f} \int_0^{T_f} \sum_{k=0}^n J_k \frac{\sin(\pi B_{JK}\tau)}{\pi\tau} \cos(2\pi f_{JK}\tau) V(t_1) V(t_2) dt_1 dt_2 \quad (13)$$

令 $B_{JK}t_1 = t'_{1K}$ 、 $B_{JK}t_2 = t'_{2K}$ 、 $\theta_K = T_p B_{JK}$ 为各频带干扰信号在 UWB 脉冲时长内的时间与干扰带宽积; $\lambda = T_f/T_p$ 为 UWB 调制的带宽扩展指数; $\eta_K = f_{JK}T_p$ 为各频带干扰在超宽带脉冲时长内的周期数, 则式(13)可变换为

$$E[J_{am}^2(jT_b)] = \sum_{k=0}^n J_k \Psi_k(\theta_k, \eta_k) \quad (14)$$

式(14)中, $\Psi_k(\theta_k, \eta_k) = \int_0^{2\theta_k} \int_0^{2\theta_k} \frac{\sin\pi(t'_{1K} - t'_{2K})}{\pi(t'_{1K} - t'_{2K})} \cos[2\pi \frac{\theta_k}{\eta_k}(t'_{1K} - t'_{2K})] V(\frac{t'_{1K}}{B_{JK}}) V(\frac{t'_{2K}}{B_{JK}}) dVt'_{1K} dt'_{2K}$

将式(14)代入式(12)可得:

$$G_{UWB} = \frac{\sum_{k=1}^n J_k \theta_k \lambda}{\sum_{k=1}^n J_k \Psi_k(\theta_k, \eta_k)} \quad (15)$$

2.2 DS-SS 抗多个频带干扰性能分析

设 DS-SS 调制的每比特信息时长也为 T_b , PN 码片时长为 T_c , $L_c = T_b/T_c$, 则在 $0 \leq t \leq T_b$ 内, 发射信号可表达为

$$S(t) = \sum_{k=0}^{L_c-1} d_0 \sqrt{\frac{E_b}{T_b}} c_k p(t - KT_c) \cos(2\pi f_c t) \quad (16)$$

式(16)中, $d_0 = \pm 1$ 为信息数据; $c_k = \pm 11$ 为 PN 码序列; $p(t)$ 为 PN 码片波形; $E_b = L_c E_c$ 为单个比特能量, E_c 为单个码片的能量; f_c 为载波频率; 假设 DS-SS 接收在完全同步的条件下进行, 则经过解扩后, 在 T_b 时刻相关处理器给出的判决量为

$$y(T_b) = \pm \frac{1}{2} L_c \sqrt{E_c} + j(T_b) \quad (17)$$

$$j(T_b) = \sum_{k=0}^{L_c-1} c_k j_k, \quad j_k = \int_K^{(K+1)T_c} T_c J(t) p(t - KT_c) \cos(2\pi f_c t) dt \quad (18)$$

利用式(18)的结果, 并忽略倍频分量, 可得:

$$E[j_k^2] = \int_0^{T_c} \int_0^{T_c} p(t_1) p(t_2) \sum_{m=1}^n J_m \frac{\sin(\pi B_{Jm}\tau)}{\pi\tau} \cos[2\pi(f_{Jm} - f_c)\tau] dt_1 dt_2 \quad (19)$$

同理令 $B_{Jm}t_1 = t'_{1m}$ 、 $B_{Jm}t_2 = t'_{2m}$ 、 $\theta_m = B_{Jm}T_c$ 、 $\Delta f_m = f_{Jm} - f_c$ 为各频带干扰信号中心频率相对于 DS-SS 调制的载频偏移, 则:

$$E[j_k^2] = \sum_{m=1}^n \frac{J_m}{4} \int_0^{\theta_m} \int_0^{\theta_m} p(\frac{t'_{1m}}{B_{Jm}}) p(\frac{t'_{2m}}{B_{Jm}}) \frac{\sin[\pi(t'_{1m} - t'_{2m})]}{\pi(t'_{1m} - t'_{2m})} \cos[2\pi \frac{\Delta f_m}{B_{Jm}}(t'_{1m} - t'_{2m})] dt'_{1m} dt'_{2m} \quad (20)$$

令 $\varepsilon_m = \Delta f_m T_c$ 为各频带干扰相对频偏相对于 DS-SS 调制带宽的比例大小, 则式(20)可改写为

$$E[j_k^2] = \sum_{m=1}^n \frac{J_m}{4} \int_0^{\theta_m} \int_0^{\theta_m} p(\frac{t'_{1m}}{B_{Jm}}) p(\frac{t'_{2m}}{B_{Jm}}) \frac{\sin[\pi(t'_{1m} - t'_{2m})]}{\pi(t'_{1m} - t'_{2m})} \cos[2\pi \frac{\varepsilon_m}{\theta_m}(t'_{1m} - t'_{2m})] dt'_{1m} dt'_{2m} \quad (21)$$

则 DS-SS 解扩输出的信干比为

$$SIR_{out} = \frac{E_b}{\sum_{m=1}^n \frac{J_m}{4} \Omega_m(\varepsilon_m, \theta_m)} \quad (22)$$

式(22)中, $\Omega_m(\varepsilon_m, \theta_m) = \int_0^{\theta_m} \int_0^{\theta_m} p(\frac{t'_{1m}}{B_{Jm}}) p(\frac{t'_{2m}}{B_{Jm}}) \frac{\sin[\pi(t'_{1m} - t'_{2m})]}{\pi(t'_{1m} - t'_{2m})} \cos[2\pi \frac{\varepsilon_m}{\theta_m}(t'_{1m} - t'_{2m})] dt'_{1m} dt'_{2m}$

则 DS-SS 的处理增益为

$$G_{DS-SS} = \frac{L_c \sum_{m=1}^n J_m \theta_m}{\sum_{m=1}^n \frac{J_m}{4} \Omega_m(\varepsilon_m, \theta_m)} \quad (23)$$

2.3 FH - SS 抗多个频带干扰性能分析

跳频通信系统的抗干扰本质为主动“躲避”^[5],但如果干扰频率击中跳频通信系统的瞬时频率时,则跳频通信系统的性能出现急剧恶化,因此如果用处理增益来描述跳频抗干扰性能时,跳频方式的处理增益应为该系统所能使用的有效频道数。一般为了克服信道间的邻近干扰,信道的间隔应至少为 $2/T_b$ (T_b 为单个信息比特的传输时长)。当存在多个频带干扰时(各频带不相互重叠,且各频带干扰的功率足以干扰有用信号),

被击中的频率数 $N_{hit} = \lceil \frac{T_b}{2} \sum_{K=1}^n B_{JK} \rceil$ ($\lceil \cdot \rceil$ 为取整运算),则这时有效的频率数(未被击中的频率数) $N_{valid} = N_{total} - N_{hit}$ (N_{total} 为系统可使用的频道总数),则 FH - SS 在多频带干扰的条件下的处理增益可写为

$$G_{FH-SS} = N_{valid} = L_c - N_{hit} \tag{24}$$

3 仿真与比较分析

UWB 调制与 DS - SS 调制都取相同的信息传输速率、基本相同的 Gaussian 脉冲波形和相同的脉冲宽度 ($T_p = T_c = 1 \text{ ns}$),频带干扰数分别选1个和3个(各频带干扰的中心频率间隔固定),且各频带干扰的功率谱的宽度与幅值相同; $\lambda = L_c = 100$;分别取 $\theta = 0.1$ 和 0.01 两个值来分别代表宽带干扰与窄带干扰;在 UWB 中, $\eta_K = f_{JK} T_p$ 代表各频带干扰在超宽带脉冲时长内的周期数,在 DS - SS 中, $\epsilon_m = \Delta f_m T_c$ 为各频带干扰的相对频偏相对于 DS - SS 调制带宽的比例大小。由于 UWB 没有载频,但可以将 UWB 的中心频率定义为“载频”(等于 $W/2$),则可以得到下式:

$$\eta_K = f_{JK} T_p = (\Delta f_m + W/2) T_p = \epsilon_K + c/2 \tag{25}$$

式(25)中, $c = 1.2971$,通过式(25)可将 UWB 中的 η_K 与 DS - SS 中的 ϵ_K 联系在一起。仿真的结果如图2所示。UWB 调制与 FH - SS 调制都取相同的信息传输速率和相同的带宽,各频带干扰的功率谱的宽度(取 $2/T_b$)与幅值相同;频带干扰数分别取1个和3个;对 UWB 与 FH - SS 的抗干扰能力随频带干扰的位置的变化进行了仿真,结果如图3所示。

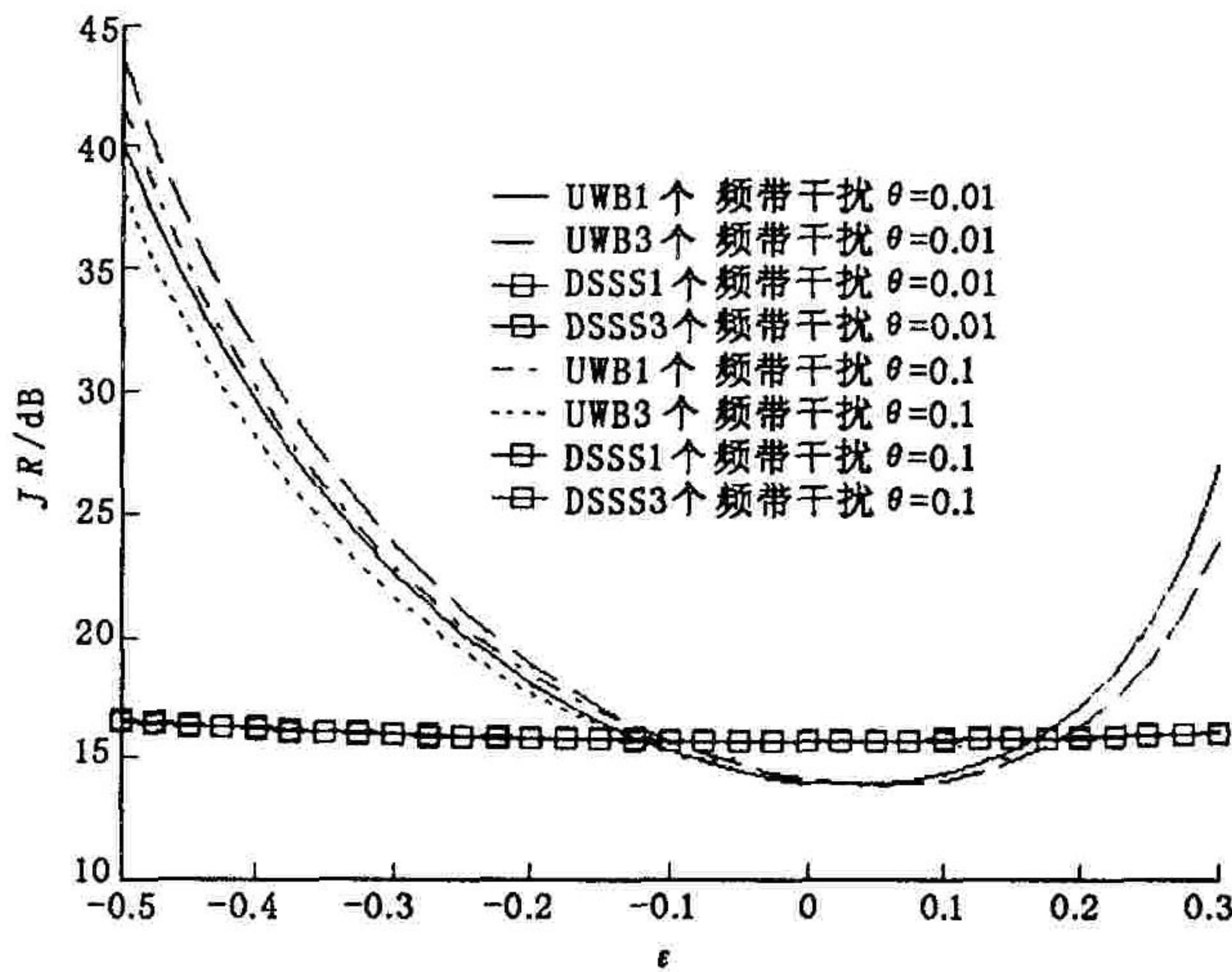


图2 UWB 和 DS - SS 抗多频带干扰性能比较图

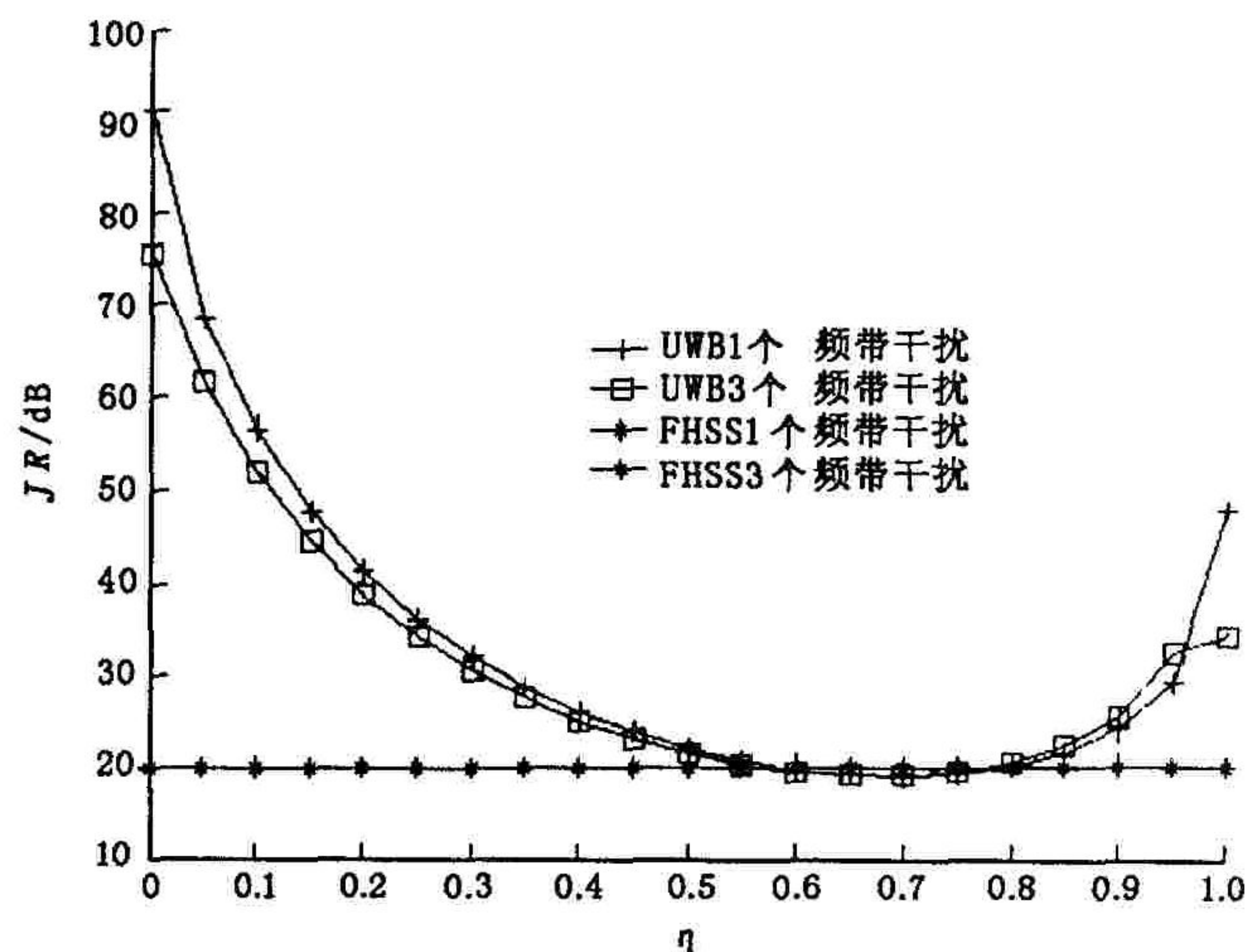


图3 UWB 与 FH - SS 抗多频带干扰性能比较图

从图2中可以看出,UWB 的 JR 对于干扰的带宽变化并不十分敏感,随着干扰的个数的增加, JR 性能有所恶化,并且受干扰信号中心频率位置的影响较大,当干扰信号中心频率在 UWB“载频”附近时,出现 JR 谷底,此时 UWB 抗多个频带干扰性能不及 DS - SS。

从图3中可以看出,UWB 的 JR 指标受干扰信号中心频率位置的影响较大,当干扰信号中心频率位置在 UWB“载频”附近时, JR 出现谷底,此时 UWB 抗多个频带干扰性能不及 FH - SS。

但在大多数情况下,从图2和图3中可以看出,UWB 的抗多个频带干扰的性能明显优于 DS - SS。

4 结论

本文分析了 UWB、DS - SS 和 FH - SS 的抗多个频带干扰的性能,分析和仿真结果表明,在大多数情况

下,UWB的抗多个频带干扰的能力明显优于DS-SS和FH-SS方式。

参考文献:

- [1] Fontana R J, Larrick J F, Cade J E. An Ultra Wideband Communication Link for Unmanned Vehicle Applications[C]. Proceeding of AUVSI97, 1997.
- [2] 岳光荣, 葛利嘉. 超宽带无线电抗干扰性能研究[J]. 电子与信息学报, 2002, 24(11): 1544 ~ 1550.
- [3] Li Zhao, Alexander M H. Performance of Ultra - Wideband Communications in the Presence of Interference[J]. IEEE Journal on Selected Areas In Communications, 2002, 20(9): 1684 - 1691.
- [4] Win M Z, Scholtz R A. Ultra - Wide Bandwidth Time Hopping Spread - Spectrum Impulse Radio for Wireless Multiple - Access Communications[J]. IEEE Trans on Comm, 2000, 48(4): 679 - 690.
- [5] 张志刚, 梅文华, 杜兴民. 跳频编码脉冲信号及其模糊图的绘制[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2002, 3(3): 63 - 67.
- [6] 狄晏珉, 孙延林, 苟彦新. 基于时频分析的S-CDMA-HFC上行通道入侵噪声抑制的研究[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2001, 3(5): 52 - 56.

(编辑: 门向生)

Performance of Ultra - Wideband Communication in the Presence of Multi - Band Interference

JIANG Lei^{1,2}, WANG Yong-sheng¹, CHENG Ren²

(1. The Electronics and Information Institute, NUPU, Xi'an, Shaanxi 710072, China; 2. The Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710077, China)

Abstract: The influence of multi-band interference on ultra-wideband (UWB) communication is analyzed in this paper. The closed form of the JR expression is derived based on the Gaussian pulse waveform. The direct sequence spread spectrum communication (DS-SS) and frequency hopping spread spectrum communication (FH-SS) are respectively compared with UWB communication in performance and analyzed in the presence of multi-band interference. According to common variable of the above three communication models, the JR performance curves can be simulated respectively. A comparison based on JR parameter between the multi-band interference suppression capabilities of above three communication models is carried out, which shows that in most cases, the multi-band interference suppression of UWB is superior to that of DS-SS and FH-SS.

Key words: ultra-wideband; jam resistance; direct sequence spread spectrum; frequency hopping spread spectrum