

文章编号: 1001-893X(2012)10-1696-06

直扩超宽带信号在移动通信系统中的干扰功率分析*

姚 恒

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘 要:对直扩超宽带(DS-UWB)信号分别于时域和频域进行描述,并对其功率谱密度进行了详细研究。在干扰功率计算中,选择现有 3G 移动标准宽带码分多址(WCDMA)、码分多址 2000(CDMA2000)和时分同步码分多址(TD-SCDMA)作为被干扰系统。与 UWB 信号带宽相比,被干扰系统的带宽相对较窄,因此假设在接收端频谱是平坦的。研究表明,可以通过调整 DS-UWB 脉冲波形和脉冲成形因子 α 来减少干扰功率。通过权衡和比较,脉冲成形因子小于 0.3 ns 的三阶高斯脉冲是一个最优选择。

关键词:直扩超宽带;3G 系统;功率密度谱;干扰功率;脉冲成形因子

中图分类号:TN911.4 **文献标志码:**A doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2012.10.027

Analysis of DS-UWB Interference Power at Mobile Communication Systems

YAO Heng

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: A Direct Spread-Ultra Wideband (DS-UWB) system model is described in time and frequency domain. Power Spectral Density (PSD) of DS-UWB system is researched. In the interference power calculation, the victim receivers are supposed to be current 3G mobile communication systems, including Wideband Code Division Multiple Access (WCDMA), Code Division Multiple Access 2000 (CDMA2000) and Time Division-Synchronous Code Division Multiple Access (TD-SCDMA). Interference Power model is presented by assuming that the spectrum is flat at the victim receiver due to relatively narrow bandwidth compared with the UWB signal band. The results show that the interference power can be reduced by regulating the pulse waveform and pulse shape factor α in DS-UWB model. The study reveals that Gaussian 3rd derivative pulse with pulse shape factor smaller than 0.3 ns is a good choice for current third generation (3G) systems by comparison and tradeoff.

Key words: DS-UWB; 3G system; power spectral density; interference power; pulse shape factor

1 引 言

超宽带(Ultra-wideband, UWB)技术是一类无线局域网通信技术,具有低功耗和高传输率的优点,尤其适用于短距离通信。早期超宽带技术应用于军事

用途,直到 2002 年美国联邦通信委员会(FCC)允许 UWB 在 3.1 ~ 10.6 GHz 内以 -41.3 dBm/MHz 的传输功率合法使用,该技术才逐渐投入民用^[1]。不同于采用连续正弦波来传送信号的传统方法,UWB 利用非常窄的时域脉冲来产生能够达到几千兆赫的宽带信号,其中直扩超宽带技术(DS-UWB)和跳时超宽带

* 收稿日期:2012-03-15;修回日期:2012-05-30

基金项目:上海大学博士生创新基金(SHUCX101090)

Foundation Item: Graduate Innovation Foundation of Shanghai University (SHUCX101090)

技术 (TH-UWB) 是 UWB 采用最广泛的两类方案。由于 UWB 覆盖频谱范围很宽, 许多的窄带系统都会和 UWB 频谱重叠。本文通过建立干扰功率计算模型来研究 DS - UWB 对现有 3G 移动通信系统 (WCDMA、CDMA2000 和 TD-SCDMA) 的干扰。

已有一些论文从不同的角度对 UWB 干扰问题进行研究, 并取得了一系列成果。在文献[2-3]中, 作者讨论了 UWB 对 GSM (Global System for Mobile communication)、UMTS (Universal Mobile Telecommunication System) 和 GPS (Global Position System) 系统的带内干扰问题, 并且计算了以 UWB 脉冲宽度为函数的干扰功率。文献[4]针对多个超宽带设备对其他通用移动通信系统的干扰进行仿真研究, 证明美国联邦通信委员会公布的频谱掩码不能够满足多 UWB 设备与其他窄带通信系统的共存要求。文献[5]中分析了直扩超宽带 (DS-UWB) 信号的功率密度谱, 并且提出了通过调整 UWB 的码片速率、脉冲形状和脉冲宽度来减少干扰功率。在文献[6]中, 作者讨论了高斯噪声模型对跳时 UWB (TH-UWB) 的影响。在文献[7]中, 作者把 TH-UWB 干扰功率建模成一个瞬态噪声过程, 同时对高斯近似值给出了先决条件。文献[8]分析了 UWB 设备对 TD-SCDMA 系统的干扰, 但没有考虑 WCDMA 和 CDMA2000 两大标准。文献[9]讨论了 UWB 和 802.11a 无线局域网标准的兼容性问题。但是, 这些对于干扰功率的分析没有专门针对现有移动通信系统, 并且分析的角度仅仅针对高斯脉冲波形。

本文着重讨论了直扩超宽带信号的功率谱密度, 并且提出了干扰功率的计算模型, 定义了仿真参数并给出了仿真结果。

2 直扩超宽带信号描述

2.1 超宽带脉冲波形选择

UWB 脉冲波形在实际中必须足够窄且必须是零直流偏移。脉冲波形的选择至关重要, 因为它直接影响到传输信号的功率密度谱 (PSD)。综合这些因素, 一些脉冲波形比如文献[10]中讨论的拉普拉斯脉冲和文献[11]提出的厄密特脉冲都符合。在本文中, 我们采用高斯脉冲波形和其各阶导数以及对偶高斯脉冲波形作为仿真波形, 其中对偶高斯波形是通过在时间上相隔 T_w 的一对反向的高斯脉冲所形成。

高斯脉冲在时域上可表示为

$$w(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} \tag{1}$$

式中, σ^2 为方差。令 $\alpha = \sqrt{4\pi\sigma^2}$, 则式(1)可记为

$$w(t) = \frac{\sqrt{2}}{\alpha} e^{-\frac{2\pi t^2}{\alpha^2}} \tag{2}$$

式中, α 被定义为成形因子。除此之外, 由高斯脉冲性质可知脉冲宽度 $T_m = 2\alpha$ 。由式(2), 我们注意到高斯脉冲在时域上是无限的, 从而不可避免导致脉冲之间混叠。因此, 合理的脉冲持续时间 T_m 必须被设定。

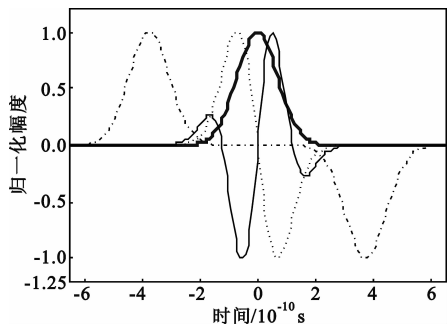
高斯脉冲求导阶数的不同影响信号的频谱。式(2)的 k 阶导数的傅里叶变换有如下特性:

$$W_k(f) \propto f^k e^{-\frac{\pi f^2 \alpha^2}{2}} \tag{3}$$

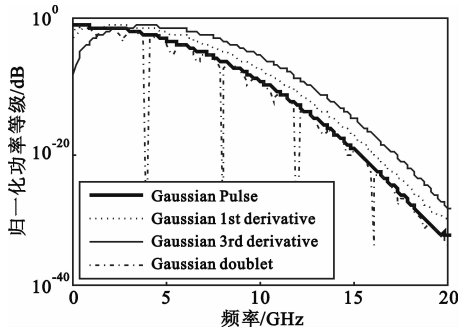
令 $W'_k(f) = 0$, k 阶高斯求导脉冲的峰值频率为

$$f_p = \frac{\sqrt{k}}{\alpha \sqrt{\pi}} \tag{4}$$

式(4)表明, 峰值频率可以通过调整高斯求导阶数和成形因子 α 来控制。阶数越高、成形因子 α 越小, 峰值频率越高。高斯脉冲波形及其一阶导、三阶导和对偶脉冲波形的时域和频域波形如图 1 所示。



(a) 时域波形



(b) 归一化功率等级波形

图 1 不同 UWB 脉冲的时域和频域波形
Fig.1 Pulse waveform in time and frequency domain

2.2 直扩超宽带信号的时域和频域描述

直扩超宽带 UWB 是一类重要的 UWB 扩频传输方案。和文献[3]专注于跳时 UWB 技术的功率谱密度不同,本文提出方法主要研究直扩 UWB 的时域和频域信号表示。根据文献[5],典型的 DS-UWB 信号 $s_j(t)$ 可以表示为

$$s_j(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=1}^N w(t - mT_d - nT_c) b_{mj} c_{nj} \quad (5)$$

其中, b_{mj} 和 c_{nj} 分别表示第 j 个用户的第 m 个数据比特和第 n 个扩频码。这里直扩信号采用脉冲幅度调制(PAM),因此 $b_{mj}, c_{nj} \in \{1, -1\}$ 。 T_c 为码片长度, N 表示每个比特脉冲数, $T_d = NT_c$ 表示符号间隔。

忽略参数 j , 并且定义 $i \equiv (mT_d + nT_c)/T_c$ 和 $\lambda_i \equiv b_m c_n \in \{1, -1\}$, 则式(5)可以简化为

$$s(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} \lambda_i w(t - iT_c) \quad (6)$$

从文献[12]中可知式(6)的自相关函数为

$$\phi_{ss}(\tau) = \frac{1}{T_c} \sum_{l=-\infty}^{\infty} \phi_{\lambda\lambda}(l) \phi_{ww}(\tau - lT_c) \quad (7)$$

由自相关函数的傅里叶变换为功率谱密度性质可知 $s(t)$ 的功率谱密度(PSD), 对式(7)进行傅里叶变换可以得到

$$\Phi_{ss}(f) = \frac{1}{T_c} \Phi_{\lambda\lambda}(f) |W(f)|^2 \quad (8)$$

其中, $W(f)$ 是脉冲信号 $w(t)$ 的傅里叶变换频域表示, $\Phi_{\lambda\lambda}(f)$ 表示信息序列 $\{\lambda_i\}$ 的 PSD, 定义如下:

$$\begin{aligned} \Phi_{\lambda\lambda}(f) &= \sum_{l=-\infty}^{\infty} \phi_{\lambda\lambda}(l) e^{-j2\pi lT_c} = \\ &\sigma_{\lambda}^2 + \frac{\mu_{\lambda}^2}{T_c} \sum_{l=-\infty}^{\infty} \delta(f - \frac{l}{T_c}) \end{aligned} \quad (9)$$

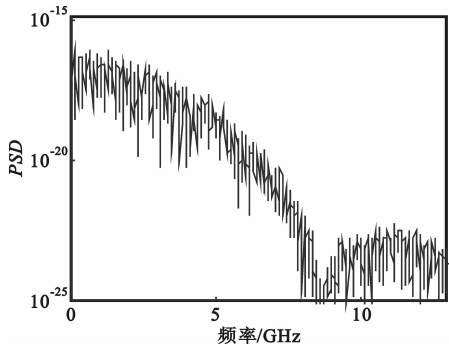
式中, σ_{λ}^2 和 μ_{λ} 分别表示信息序列的方差和均值。把 $\Phi_{\lambda\lambda}(f)$ 代入式(8), 可以得到

$$\Phi_{ss}(f) = \frac{\sigma_{\lambda}^2}{T_c} |W(f)|^2 + \frac{\mu_{\lambda}^2}{T_c^2} \sum_{l=-\infty}^{\infty} \left| W\left(\frac{l}{T_c}\right) \right|^2 \delta\left(f - \frac{l}{T_c}\right) \quad (10)$$

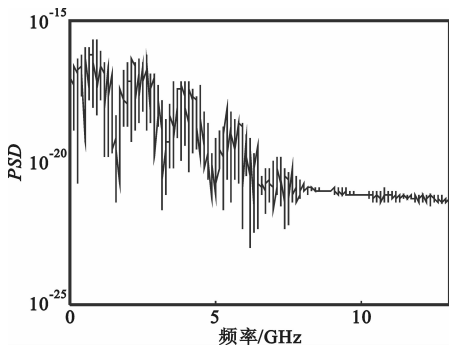
其中, 式(10)等式右边第一项是连续谱, 其形状取决于信号脉冲 $w(t)$ 的谱特性。第二项是由频域上相隔 $1/T_c$ 的离散谱构成的。此外, 当信息符号均值为 0、方差为 1 时, 离散成分为 0, 则式(10)可以简化为

$$\Phi_{ss}(f) = \frac{\sigma_{\lambda}^2}{T_c} |W(f)|^2 \quad (11)$$

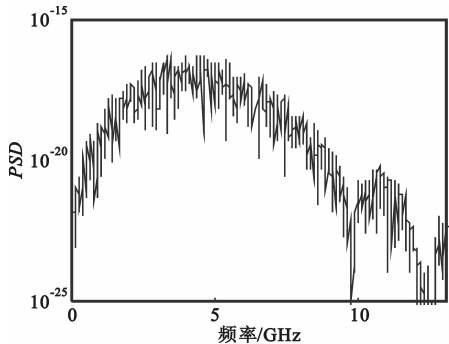
波形 $w(t)$ 对移动通信系统的干扰将重点讨论。图 2(a) ~ (c) 分别为高斯脉冲、对偶高斯脉冲和三阶导数的高斯脉冲调制的 DS-UWB 信号的功率谱密度。



(a)高斯脉冲



(b)对偶高斯脉冲



(c)三阶导数高斯脉冲

图 2 不同 UWB 脉冲的功率谱密度
Fig.2 PSD of different UWB pulse waveforms

3 DS-UWB 干扰功率计算模型

假设接收机的载波频率和带宽分别为 f_c 和 B , 则信号的通带可以表示成 $[f_c - B/2, f_c + B/2]$, 接收机带内的干扰功率可以表示为

$$\begin{aligned} P_I &= \int_{-\infty}^{\infty} \Phi_{ss}(f) |H(f)|^2 df = \\ &\frac{\sigma_{\lambda}^2}{T_c} \int_{-\infty}^{\infty} |W(f)H(f)|^2 df + \\ &\frac{\mu_{\lambda}^2}{T_c^2} \sum_{l=-\infty}^{\infty} \left| W\left(\frac{l}{T_c}\right) H\left(\frac{l}{T_c}\right) \right|^2 \end{aligned} \quad (12)$$

其中, $H(f)$ 是接收机滤波器的频率响应。假设 $H(f)$ 是理想的带通滤波器,形式如式(13)所示:

$$H(f)=\begin{cases}1, & f\in\left[f_c-\frac{B}{2},f_c+\frac{B}{2}\right]\cup\left[-f_c-\frac{B}{2},-f_c+\frac{B}{2}\right] \\ 0, & \text{其他}\end{cases}$$

(13)

由式(13)把 $H(f)$ 代入式(12),式(12)可以写成

$$P_I=\frac{2\sigma_\lambda^2}{T_c}\int_{f_c-B/2}^{f_c+B/2}|W(f)|^2df+\frac{2\mu_\lambda^2}{T_c^2}\sum_{l=T_c(f_c-B/2)}^{T_c(f_c+B/2)}\left|W\left(\frac{l}{T_c}\right)\right|^2$$

(14)

式(13)表示在有扰系统下,DS-UWB 信号的干扰功率取决于码片长度 T_c 、信息符号的方差 σ_λ^2 和均值 μ_λ 、脉冲波形的能量谱密度 $|W(f)|^2$ 以及有扰接收机的系统参数。

4 DS-UWB 在移动通信系统中的干扰功率分析

4.1 系统参数的设定

我们采用 MATLAB 软件对 DS-UWB 对移动通信系统中的带内干扰进行模拟。为了减少复杂度,假定所有的计算都在单用户情况下进行。DS-UWB 的模拟参数如表 1 所示。

表 1 单用户 DS-UWB 模拟参数
Table 1 Simulation parameters of DS-UWB

参数类型	相应值
采样频率 f_s/GHz	50
平均传输功率 $P_T/(\text{dBm}/\text{MHz})$	-41.3
扩频因子 N	31
高斯偶脉冲的时间间隔 T_w	$T_m+0.2\text{ ns}$
高斯导数阶数 k	0,1,2,3
成形因子 α/ns	0.1,0.15,⋯,2

移动通信系统选择目前国际通用的 3G 标准,即 WCDMA、CDMA2000 和 TD-SCDMA。这些标准在中国的频带分配如表 2 所示。其中 WCDMA 可以有两种不同的双工技术:频分双工(FDD)和时分双工(TDD)。CDMA2000 是从 2G CDMAOne 标准延伸演化过来为 3G 服务的一种技术。1X 是 CDMA2000 的第一阶段,3X 是它的未来阶段,TD-SCDMA 是中国提出的 3G 的标准。关于 UWB 的干扰计算的模拟主要是

基于以上系统,各接收机模拟参数如表 2 所示。

表 2 移动通信系统中被干扰接收机参数
Table 2 Parameters of the victim receiver

被干扰系统	上行链路	下行链路	带宽 /MHz
	频谱范围/MHz	频谱范围/MHz	
WCDMA-FDD	1 920 ~ 1 980	2 110 ~ 2 170	5.00
WCDMA-TDD	1 900 ~ 1 920	2 010 ~ 2 025	5.00
CDMA2000-1X	1 850 ~ 1 910	1 930 ~ 1 990	1.25
CDMA2000-3X	1 850 ~ 1 910	1 930 ~ 1 990	3.75
TD-SCDMA	2 300 ~ 2 400	16	

4.2 分析结果

在干扰功率的计算中,比特能量和扩频因子 N 是固定的,此时干扰功率仅是脉冲成形因子 α 的函数。另外,由于 3G 系统的带宽比 UWB 信号带宽小很多,因此可以假设 UWB 信号的 PSD 在干扰系统的带宽内是平坦的。为了简便,忽略无线信道、天线增益和系统损耗的影响。图 3 给出了利用 3 种不同脉冲(高斯脉冲、高斯三阶导函数脉冲和高斯偶脉冲)的 DS-UWB 信号对 WCDMA-FDD 上行和下行链路的干扰功率,结果表明上行和下行链路相差不大。图 4 示出了 DS-UWB 信号对 WCDMA-TDD 系统的干扰功率。图 5 的结果说明了 DS-UWB 在 CDMA2000-3X 系统中的干扰功率比在 CDMA2000-1X 系统中大,因为前者带宽是后者带宽的 3 倍。图 6 给出了 DS-UWB 信号对 TD-SCDMA 系统的干扰功率。对于 DS-UWB 信号的 3 种脉冲波形的 DS-UWB 信号来说,结果和图 3 ~ 5 相似。比较图 6 和图 3 ~ 5 可以看出,DS-UWB 信号对 TD-SCDMA 系统中的干扰功率比 WCDMA 和 CDMA2000 系统中要低。

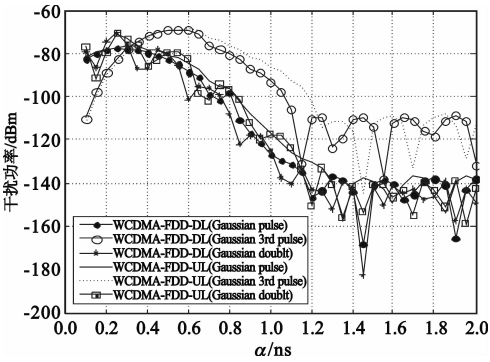


图 3 DS-UWB 信号对 WCDMA-FDD 系统的干扰功率
Fig.1 3 Interference Power of DS-UWB at WCDMA-FDD system as a function of α

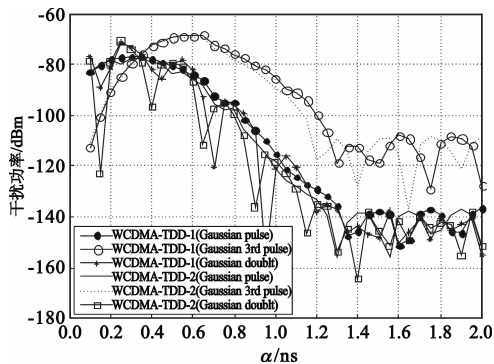


图 4 DS-UWB 信号对 WCDMA-TDD 系统的干扰功率
Fig.4 Interference Power of DS-UWB at WCDMA-TDD system as a function of α

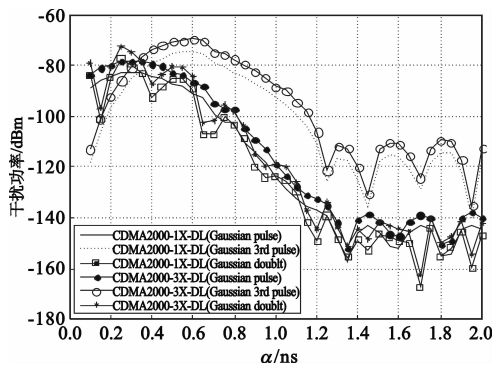


图 5 DS-UWB 信号对 CDMA2000-1X 和 CDMA2000-3X 系统的干扰功率
Fig.5 Interference Power of DS-UWB at CDMA2000-1X and CDMA2000-3X systems as a function of α

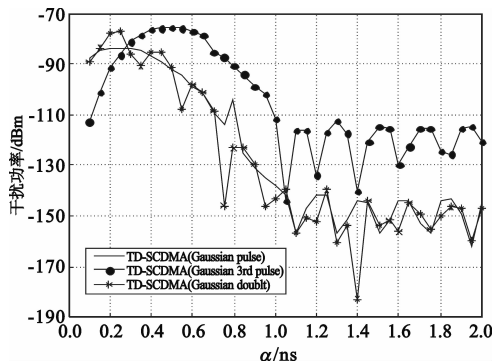


图 6 DS-UWB 信号对 TD-SCDMA 系统的干扰功率
Fig.6 Interference Power of DS-UWB at TD-SCDMA system as a function of α

图 3~6 说明当脉冲成形因子 α 大约小于 0.3 ns 时,三阶高斯导函数脉冲的性能最好,大于 0.3 ns 时则是高斯偶脉冲最好。我们可以从式(4)看出,为了达到较高的峰值频率,脉冲成形因子 α 应该设定较小。此外,在产生极短的脉冲中,比较小的 α 值的选择受到了硬件的限制。因此,通过权衡干扰功率

和技术限制,脉冲成形因子小于 0.3 ns 的三阶高斯导函数脉冲是比较好的选择。

图 7 示出了采用三阶高斯导函数脉冲的 DS-UWB 对 WCDMA、CDMA2000 和 TD-SCDMA 系统的干扰功率,结果表明在带宽相当的情况下,TD-SCDMA 系统比其他两个更具有抗干扰能力。

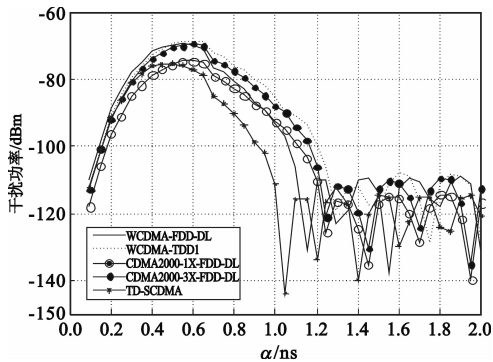


图 7 3 种不同的 3G 系统中三阶高斯导函数脉冲的干扰功率
Fig.7 Interference Power caused by Gaussian 3rd derivative pulse in three different 3G systems

5 结 论

本文首先研究了 UWB 脉冲波形的时域和频域特性,在现有 TH-UWB 功率谱密度研究成果基础上,详细分析了 DS-UWB 信号的功率谱密度。研究表明,脉冲波形 $w(t)$ 、码片速率 $1/T_c$ 和信息序列的统计特征是影响频谱的主要因素。论文提出了一个干扰功率的计算模型,并分析了采用高斯脉冲、高斯三阶导函数脉冲和高斯偶脉冲时 DS-UWB 信号对 WCDMA、CDMA2000 和 TD-SCDMA 系统的干扰功率,结果表明,采用脉冲成形因子小于 0.3 ns 的高斯三阶导函数脉冲是比较合适的选择,且中国自主提出的 TD-SCDMA 相较于其他两类标准具有更好的抵抗 UWB 信号干扰的特性。在已有研究基础上,UWB 信号对 HSDPA、WiMAX 和 LTE 系统的干扰将作为下一阶段研究重点。

参考文献:

- [1] Federal Communication Commission. Revision of Part 15 of the commission's rules regarding ultra-wideband transmission systems[R]//FCC 02-48. [S.l.]: FCC, 2002.
- [2] Hamalainen M, Hovinen V, Tesi R, et al. On the UWB system coexistence with GSM900, UMTS/WCDMA, and GPS [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2002, 20(9): 1712-1721.

- [3] Hamalainen M, Linatti J, Oppermann I, et al. Co-existence measurements between UMTS and UWB systems [J]. IEE Proceedings of Communications, 2006, 153(1): 153 – 158.
- [4] 陆音, 吴常国, 朱洪波. 脉冲 UWB 系统对 UMTS 系统的干扰分析[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2010, 30(3): 5 – 9.
LU Yin, WU Chang-guo, ZHU Hong-bo. Analysis of interference of impulse UWB systems with UMTS systems[J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science), 2010, 30(3): 5 – 9. (in Chinese)
- [5] Ye Z, Madhukumar A S, Francois C. Power spectral density and in-band interference power of UWB signals at narrowband systems[C]//Proceedings of 2004 IEEE International Conference on Communications. Paris, France: IEEE, 2004: 3561 – 3565.
- [6] Foerster J R. Interference modeling of pulse-based UWB waveforms on narrowband systems[C]//Proceedings of 2002 IEEE Vehicle Technology Conference. Vancouver, Canada: IEEE, 2002: 1931 – 1935.
- [7] Fontana R J. An insight into UWB interference from a shot noise perspective[C]//Proceedings of IEEE Conference on Ultra-Wideband Systems and Technologies. Baltimore, USA: IEEE, 2002: 97 – 100.
- [8] Wang W, Zhao L, Zhao C L, et al. The impact of ultrawide-band devices on TD-SCDMA system[C]//Proceedings of the 1st International Conference on Communications and Networking in China. Beijing: IEEE, 2006: 1 – 4.
- [9] Chiani M, Giorgetti A. Coexistence between UWB and narrow-band wireless communication systems[J]. Proceedings of the IEEE, 2009, 97(2): 231 – 254.
- [10] Conroy J T, Locicero J L, Ucci D R. Communication techniques using monopulse waveforms [C]//Proceedings of 1999 IEEE Military Communication Conference. Atlantic City, USA: IEEE, 1999: 1181 – 1185.
- [11] Ghayami M, Michael L B, Haruyama S, et al. A novel UWB pulse shape modulation system[J]. Wireless Personal Communication, 2002, 23(1): 105 – 120.
- [12] Proakis J G. Digital communications [M]. 4th ed. New York: McGraw – Hill, Inc., 2001.

作者简介:

姚 恒(1982—),男,安徽人,2008 年于上海师范大学获工学硕士学位,2012 年于上海大学获博士学位,现为讲师,主要研究方向为数字图像认证、模式识别和通信信号处理。

YAO Heng was born in Anhui Province, in 1982. He received the M.S. degree from Shanghai Normal University and the Ph.D. degree from Shanghai University in 2008 and 2012, respectively. He is now a lecturer. His research interests include digital image forensics, pattern recognition and communication information processing.

Email: contact@yaoheng.info