

UWB通信信号的频谱分析

陈启兴¹, 游志军², 牟能文²

(1. 成都电子机械高等专科学校 成都 610031; 2. 海军驻成都电子设备军事代表室 成都 610031)

【摘要】分析了超宽带冲激无线电的脉位调制、通断键控调制和脉冲幅度调制的信号模型。阐述了UWB通信的传输速率高、保密性能好和抗多径衰落强等优点。推导了UWB通信信号的时域和功率谱密度闭式表达式, 并对UWB通信信号频谱进行了分析, 并对实际UWB通信信号的功率谱密度进行了计算机仿真。

关键词 超宽带; 无线宽带通信; 功率谱密度; 频谱分析

中图分类号 TN95 文献标识码 A

Spectrum Analysis of the Signal of UWB Communication

CHEN Qi-xing¹, YOU Zhi-jun², MU Neng-wen²

(1. Chengdu Electromechanical College Chengdu 610031;

2. Representative Agency of Electric Equipment of the Navy Located in Chengdu Chengdu 610031)

Abstract The ultra wideband (UWB) radio models have been introduced with pulse-position-modulation (PPM), on-off-keying (OOK) and pulse-amplitude-modulation (PAM). The advantages of UWB communication have been set forth such as very high transformation rates, excellent security, fading against multi-path, and so on. The closed form expression of the time domain and power spectrum density has been derived, and the power spectrum has been analyzed for the signal of UWB communication, and the power spectrum of the real signal of UWB communication has been simulated by computer.

Key words ultra wide-band; wireless wide-band communication; power spectrum density; spectrum analysis

超宽带(Ultra Wide-Band, UWB)通信技术是一种无载波通信技术, 采用ns数量级, 甚至ps数量级的非正弦波窄脉冲传输数据^[1]。UWB通信将在短距离无线通信领域发挥重要作用, 特别是对便携式装置和家用设备之间的ad hoc网络产生重大影响^[2]。根据FCC的规定, UWB通信所用脉冲的要求是带宽与中心之比(分数比)大于等于0.25或者信号带宽大于500 MHz^[3]。目前, FCC为UWB通信开放的频带为3.1~10.6 GHz^[4]。为了实现频谱覆盖的初衷, 信号的功率谱必须低于某个极限。在现有的文献中, 仅文献[5]针对TM-UWB(Time-Hopping Modulated UWB)、DSC-UWB(Direct Sequence phase Coded UWB)两种方式进行了功率谱分析, 本文对常用的脉位调制(PPM), 通断键控调制(OOK), 脉冲幅度调制(PAM)进行功率谱分析。

1 UWB基本脉冲的时域和频域分析

UWB所用基本脉冲通常为高斯单脉冲、一阶高斯微分双脉冲、二阶高斯微分三脉冲^[6]。设 E 为幅度, $g(t)$ 为幅度等于1、宽度等于 T_b (码元周期)的门函数, τ 为参数, S_a 为抽样函数, “*”表示卷积, 则高斯单脉冲

的时域表达式 $f(t)$ 和傅里叶变换表达式 $F(\omega)$ 为:

$$f(t) = E \exp[-(t/\tau)^2] g(t) \quad (1)$$

$$F(\omega) = (0.5E\tau/\sqrt{\pi}) \exp(-\omega^2\tau^2/4) * [T_b \text{Sa}(\omega T_b)] \quad (2)$$

一阶高斯微分双脉冲的时域表达式 $g_1(t)$ 和傅里叶变换表达式 $G_1(\omega)$ 为:

$$g_1(t) = -(2E/\tau^2)t \exp[-(t/\tau)^2] g(t) \quad (3)$$

$$g_1(\omega) = (j0.5E\tau/\sqrt{\pi})\omega \exp(-\omega^2\tau^2/4) * [T_b \text{Sa}(\omega T_b)] \quad (4)$$

二阶高斯微分三脉冲的时域表达式 $g_2(t)$ 和傅里叶变换表达式 $G_2(\omega)$ 为:

$$g_2(t) = 2E[(2E/\tau^4)t^2 - (1/\tau^2)] \exp[-(t/\tau)^2] g(t) \quad (5)$$

$$G^2(\omega) = (-0.5\omega^2 E\tau/\sqrt{\pi}) \exp(-\omega^2\tau^2/4) * [T_b \text{Sa}(\omega T_b)] \quad (6)$$

2 UWB通信信号的时域和频域分析

本文以二进制为例, 分别分析UWB通信信号的三种调制信号的时域和频域特性: 脉冲幅度调制(PAM), 通断键控调制(OOK), 跳时脉位调制(TH-PPM)。

2.1 PAM

PAM的时域表达式为:

$$S(t) = \sum a_k u(t - kT_b) \quad (7)$$

式中 $u(t)$ 为基本脉冲, T_b 为码元周期, a_k 为数据, $a_k = \begin{cases} \lambda_1 & \text{出现的概率为 } P \\ \lambda_2 & \text{出现的概率为 } 1-P \end{cases}$

$S(t)$ 可以分解为稳态项 $S_v(t)$ 和交变项 $S_u(t)$:

$$S_v(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} [P\lambda_1 u(t - T_b) + (1-P)\lambda_2 u(t - kT_b)] = [P\lambda_1 + (1-P)\lambda_2] \sum_{k=-\infty}^{\infty} u(t - kT_b) \quad (8)$$

$$S_u(t) = S(t) - S_v(t) = \left\{ \begin{array}{l} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \lambda_1 u(t - kT_b) - [P\lambda_1 + (1-P)\lambda_2] \sum_{k=-\infty}^{\infty} u(t - kT_b) \quad (\text{概率为 } P) \\ \sum_{k=-\infty}^{\infty} \lambda_2 u(t - kT_b) - [P\lambda_1 + (1-P)\lambda_2] \sum_{k=-\infty}^{\infty} u(t - kT_b) \quad (\text{概率为 } 1-P) \end{array} \right\} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} q_k (\lambda_1 - \lambda_2) u(t - kT_b) \quad (9)$$

式中

$$q_k = \begin{cases} 1-P & \text{出现的概率为 } P \\ -P & \text{出现的概率为 } 1-P \end{cases} \quad (10)$$

显然, $S_v(t)$ 是周期为 T_b 的周期信号, 其傅里叶级数为:

$$S_v(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} V_m \exp(j2\pi mt/T_b) \quad (11)$$

式中 $V_m = 1/T_b \int_0^{T_b} S_v(t) \exp(-2j\pi t/T_b) dt = \{[P\lambda_1 + (1-P)\lambda_2]/T_b\} \int_0^{T_b} u(t) \exp(j2\pi mt/T_b) dt$

设 $u(t)$ 的傅里叶变换为 $U(\omega)$, 由于 $u(t)$ 除区间 $[0, T_b]$ 外都为零, 因此:

$$V_m = \{[P\lambda_1 + (1-P)\lambda_2]/T_b\} U(2\pi m/T_b) \quad (12)$$

$S_v(t)$ 的功率谱密度函数 $P_v(\omega)$ 为:

$$P_v(\omega) = 2\pi \sum_{m=-\infty}^{\infty} |V_m|^2 \delta(\omega - 2\pi m/T_b) = 2\pi \left[\frac{P\lambda_1 + (1-P)\lambda_2}{T_b} \right]^2 \sum_{m=-\infty}^{\infty} |U(2\pi m/T_b)|^2 \delta[\omega - (2\pi m/T_b)] \quad (13)$$

设 $S_u(t)$ 的截短函数为 $S_{uT}(t) = S_u(t)[\text{unit}(t) - \text{unit}(t-T)]$, 其中 $\text{unit}(t)$ 为单位阶跃函数, $S_{uT}(t)$ 的傅里叶变换 $P_{uT}(\omega)$ 为:

$$P_{uT}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} S_{uT}(t) \exp(-j2\pi t) dt = \int_0^T S_u(t) \exp(-j2\pi t) dt = U(\omega) \sum_{k=-N}^N q_k \exp(-jk\omega T_b) \quad (14)$$

$$|P_{uT}(\omega)|^2 = P_{uT}(\omega) P_{uT}^*(\omega) = |U(\omega)|^2 \sum_{k=-N}^N \sum_{m=-N}^N q_m q_k e^{j(m-k)\omega T_b} \quad (15)$$

$|P_{uT}(\omega)|^2$ 的统计平均为:

$$E\{|P_{uT}(\omega)|^2\} = |U(\omega)|^2 \sum_{k=-N}^N \sum_{m=-N}^N E(q_m q_k) \exp([j(m-k) \omega T_b])$$

当 $m=k$ 时, 由式(10)知道, $E(q_m q_k) = P(1-P)$; 当 $m \neq k$ 时, 一般数据位之间互相独立, $E(q_m q_k) = E(q_m)E(q_k)$, 而 $E(q_m) = P(1-P) + (1-P)(-P) = 0$, 即 $E(q_m q_k) = 0$, $E\{|P_{uT}(\omega)|^2\} = |(2N+1)P(1-P)U(\omega)|^2$ 。则 $S_u(t)$ 的功率谱为:

$$P_u(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{E\{|P_{uT}(\omega)|^2\}}{T} = P(1-P)|U(\omega)|^2 / T_b \quad (16)$$

故采用 PAM 调制方式的 UWB 通信信号的功率谱密度函数为:

$$P(\omega) = 2\pi \{ [p\lambda_1 + (1-p)\lambda_2] / T_b \}^2 \sum_{m=-\infty}^{\infty} |U(2\pi m / T_b)|^2 \delta(\omega - 2\pi m / T_b) + P(1-P)|U(\omega)|^2 / T_b \quad (17)$$

上式的特点有: (1) 一般包括离散谱和连续谱; (2) 当两种数据位等概率出现 ($P=0.5$) 且采用双极性信号 ($\lambda_1 = -\lambda_2$) 时, 由式(12)、(13)可知无离散谱; (3) 连续谱的包络就是 UWB 基本脉冲信号的功率谱密度; (4) 离散谱振幅值正比于 UWB 基本脉冲信号的功率谱密度在 $2\pi m / T_b$, $m \in Z$ 点的抽样值。

2.2 OOK

OOK 调制方式是 PAM 调制方式的一种特殊情况, 即: $\lambda_1 = 1$, $\lambda_2 = 0$, 由 2.1 节的方法可以得到:

$$P(\omega) = 2\pi (P^2 / T_b^2) \sum_{m=-\infty}^{\infty} |U(2\pi m / T_b)|^2 \delta(\omega - 2\pi m / T_b) + P(1-P)|U(\omega)|^2 / T_b \quad (18)$$

上式的特点有: (1) 包括离散谱和连续谱; (2) 连续谱的包络就是基本 UWB 脉冲信号的功率谱密度; (3) 离散谱振幅值正比于基本 UWB 脉冲信号的功率谱密度在 $2\pi m / T_b$, $m \in Z$ 点的抽样值。

2.3 TH-PPM

TH-PPM 调制方式时域表达式为^[7]:

$$S(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} u(t - kT_b - a_k \tau) \quad (19)$$

式中 $u(t)$ 为基本脉冲; T_b 为码元周期; 参数 $\tau \in (0, T_b)$; a_k 为数据, 且:

$$a_k = \begin{cases} 1 & \text{出现的概率为 } P \\ 0 & \text{出现的概率为 } 1-P \end{cases}$$

利用 2.1 节的方法, 可以得到:

$$P(\omega) = (2\pi / T_b) |P e^{-j\omega\tau} - (1-P) \sum_{k=-\infty}^{\infty} |U(2\pi m / T_b)|^2 \delta(\omega - 2\pi m / T_b) + P(1-P) |e^{-j\omega\tau} - 1|^2 |U(\omega)|^2 / T_b \quad (20)$$

上式的特点有: (1) 包括离散谱和连续谱; (2) 连续谱的包络就是基本 UWB 脉冲信号的功率谱密度乘以频率选择性函数 $|e^{-j\omega\tau} - 1|^2$; (3) 离散谱振幅值正比于频率选择性函数 $|P e^{-j\omega\tau} - (1-P)|^2$ 与 UWB 基本脉冲信号的功率谱密度在 $2\pi m / T_b$, $m \in Z$ 点的抽样值之乘积。

计算机实时仿真表明, UWB 通信信号的跳时脉位调制 (TH-PPM)、通断键控调制 (OOK) 和脉冲幅度调制 (PAM) 的功率谱密度与式 (17)、(18)、(20) 是一致的。

3 结 论

通过推导 UWB 通信信号的跳时脉位调制 (TH-PPM)、通断键控调制 (OOK) 和脉冲幅度调制 (PAM) 的信号模型的时域和功率谱密度的表达式, 同时对 UWB 通信信号的频域进行了分析, 可以看出 UWB 通信具有传输速率高、保密性能好和抗多径衰落强等优点。对于 PAM, UWB 通信信号一般既有离散谱又有连续谱, 当且仅当符号出现为等概率时, 没有离散谱, 连续谱的包络就是 UWB 基本脉冲信号的功率谱密度, 离散谱的振幅值正比于 UWB 基本脉冲信号的功率谱密度在 $2\pi m / T_b$, $m \in Z$ 点的抽样值。而对于 OOK、TH-PPM, UWB 通信信号既有离散谱又有连续谱, 连续谱的包络就是 UWB 基本脉冲信号的功率谱密度, 离散谱的振幅值正比于 UWB 基本脉冲信号的功率谱密度在 $2\pi m / T_b$, $m \in Z$ 点的抽样值。

断概率。可以看出采用动态分配算法时,在中心小区的话务量增大到一定程度以后,7小区和中心小区的上行中断概率都有较明显的降低。但在话务量较低时,采用动态分配算法的效果反而不好,这是因为此时中心小区的覆盖范围过大,以致于部分离中心小区基站较远的移动台因路径损耗过大而发生中断。

4 结 论

动态分配算法只需要根据干扰状况动态调整中心小区的导频发射功率,实现简单。在歌剧院、足球场等场所,业务负荷随时间变化较大,如果资源配置较少易出现负荷过载的情况,配置较多又会造成浪费。本文提出的动态分配算法非常适合在上述场合使用。

参 考 文 献

- [1] 朱立东,吴诗其.多业务CDMA蜂窝移动通信系统的负荷控制[J].系统工程与电子技术,2003,25(6):643-647
- [2] Chen X H. Adaptive traffic-load shedding and its capacity gain in CDMA cellular systems[J]. IEE Proc-Commun, 142(3): 186-192
- [3] Chen X H, Lee Caleb Joshua K L. A novel adaptive traffic load shedding scheme for CDMA cellular mobile systems[C]. ICCS, Singapore, 1994
- [4] Bahng Seungiae, Koo Insoo, Yang Jeongrok, et al. Flexible call admission control schemes for ds-cdma systems with non-uniform traffics[C]. IEEE TENCON, Chiang-Mai, Thailand, 1999

编辑 熊思亮

(上接第439页)

参 考 文 献

- [1] Win M Z, Scholtz R A. Ultra-wide band time-hopping spread-spectrum impulse radio for wireless access communications[J]. IEEE Trans on Communications, 2000, 48(4): 679-690
- [2] Jeff F. Ultra-wideband technology for short-Range, high-rate wireless communications [EB/OL]. www.intel.com/technology/itj/q22002/pdf/art_4.pdf, 2003-04-01
- [3] 李耀民,周正.无线超宽带调制方式现状与展望[J].通信技术,2003,(10):48-50
- [4] 黎海涛.超宽带无线通信的进展[J].信息网络,2003,(8):23-25
- [5] 郑继禹,林基明,仇洪冰,王玫.超宽带多址通信信号的功率谱分析[J].电子学报,2003,31(10):1575-1577
- [6] 李会勇,高昕艳,徐政五.UWB在室内高速无线传输中的应用研究[J].电子科技大学学报,2003,32(6):604-607
- [7] Scholtz R A. Multiple access with time-hopping impulse modulation[A]. Milcom 93[C]. 1993, 2: 447-450

编辑 徐安玉