

A Method of Reducing the PAPR of Wireless Sensor Networks Based on OFDM^{*}

KONG Depeng^{1*}, ZHOU Guohua¹, HE Ting², FANG Dongliang¹, XU Yun¹

(1. The Center of Technology and Education Development Research, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China;

2. Hangzhou Nanjiang Internet of things Technology Co., Ltd., Hangzhou 310023, China)

Abstract: These features can be completed of data collection, processing and communication in wireless sensor networks (WSNs), the ultra-wideband technology (UWB) used in WSNs can effectively reduce system power consumption and be easily compatible with other systems and better adapt to different environments than before scheme, during the large flow of media information collection and transmission. Using ultra-wideband technology to complete signal transmission by the method of OFDM modulation, there will exist a very high peak to average power ratio (PAPR) to the system. This paper presents an inverted hyperbolic tangent pulse shaping technology, which through data and forming matrix product to realize the correlation between subcarrier symbols, in order to reducing the system peak to average power ratio. This paper provides the design of a multi-carrier solutions implemented and validated by comparing the Complementary Cumulative Distribution Function (CCDF) and symbol error ratio (BER) index found that the scheme can reach the result of reduce 4 dB, it proves that the method is feasible.

Key words: WSNs (Wireless Sensor Networks); OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing); UWB (Ultra-Wideband) Technology; PAPR (Peak-to-Average Power Ratio); multi-carrier system

EEACC: 6150P

doi: 10.3969/j.issn.1004-1699.2014.04.023

一种基于 OFDM 的无线传感器网络 PAPR 减小方法^{*}

孔德彭^{1*}, 周国华¹, 何 婷², 方栋良¹, 徐 云¹

(1. 浙江工业大学技术与教育发展研究中心, 杭州 310023; 2. 杭州南江物联网科技有限公司, 杭州 310031)

摘 要: 无线传感器网络 (WSNs) 集数据采集、处理和通信于一体, 在进行大流量媒体信息采集和传输时, 采用超宽带技术 (UWB) 能有效降低 WSNs 系统功耗并可以方便与其他系统兼容, 并较好适应不同的环境; 但是超宽带信号使用 OFDM 调制技术完成信号传输时, 会带给系统较高的峰均功率比。提出一种反转双曲正切脉冲成型技术, 通过数据与成型矩阵求积, 实现子载波符号间的相关性, 进而减小系统峰均功率比。文中给出了采用多载波实施设计的方案并进行验证, 通过互补积分函数 (CCDF) 和误码率 (BER) 指标的对比发现, 该方案能得出降低 4 dB 的效果, 证明该方法切实可行。

关键词: 无线传感器网络; 正交频分复用; 超宽带技术; 峰均功率比; 多载波系统

中图分类号: TN929.53

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2014)04-0551-06

无线传感器网络 (Wireless Sensor Networks, WSNs) 是物联网产业的支撑技术之一, 对促进经济发展和科技进步具有重要意义^[1], 因为其部署迅速、固定方便、组网便捷、不受节点限制, 在战场检测、灾难施救和环境感知等方面得以广泛应用^[2-3], 故 WSNs 成为学术和工业界研究的热点。WSNs 通过感应节点把信息传递给用户, 需要使用感知、采集、嵌入分布和通信等技术来完成的信息相关的采

集、处理和传输任务, 但因 WSNs 分布密集、数量大, 易受拓扑结构不定、能耗保障不力、计算和存储能力有限等方面问题的影响^[4], 尤其是节点的成本和能耗是制约着节点的广泛应用与推广的关键问题。

当前无线传感器网络信息传输的有两个 IEEE 标准, 其中 IEEE802.15.4 是为低速无线个人局域网设计的, 另一个是 IEEE802.13.3a 标准, 把处于 3.1 GHz ~ 10.6 GHz 之间的 7.5 GHz 频带的超宽

项目来源: 国家科技支撑子项目 (2012BAI34B03); 国家社科基金重大项目 (12&ZD229); 教育部人文社科规划项目 (13YAZH043)

收稿日期: 2014-01-16 修改日期: 2014-04-10

带 UWB (Ultra-Wideband) WPAN 物理层提供给 WSNs 使用^[5],允许多个信号共同占据整个带宽,与蓝牙和无线局域网比较,UWB 比较适合大量的媒体信息(音频、视频和图像)采集、传输及处理,可以有效减低能耗,提高系统的适应性和兼容性^[6];与单频带比较,功耗更低、抗多径能力强和具有较低的误码率,弥补无线网络的功耗偏高和环境适应能力不足的缺点。由于多频带存在不同的子载波,子载波可以使用不同的数据调制模式,而正交频分复用 OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 技术比较适合超带宽无线通信系统,因 OFDM 技术具有抗窄带和码间干扰能力、信道利用率高等优点^[7],目前在无线局域网、视频通信、音频广播和非对称数字用户中应用广泛^[8]。但与单载波相比,同一时刻 OFDM 存在多个正交子波,输出信道是多个子信道多层叠加,存在易受频率偏差的影响和带来了较高的峰均功率比 PAPR (Peak to Average Power Ratio) 的弊端。

1 信道非线性分析

无线通信信道环境多变、频谱资源稀缺一直是困扰移动通信的难题,高速数据传输增加均衡器的复杂性^[9],这样必须要求较高频谱。无线传感器网络在通信传输过程中要经过非线性元件,如功率放大器、模数转换器和分频仪等,较高的非线性器件是影响包络信号的关键因素^[10],为了较详细表述其影响特性可以用下式来表示:

$$y_k = F(|\xi_k|) e^{j \arg(\xi_k)} \quad (1)$$

其中,信号包络的输入/输出可以用 ξ_k/y_k 代替, $F(\cdot)$ 非线性变换表达式; $\arg(\cdot)$ 是具体变换特性。式(2)可以用来描述 PAPR 的性能关系。

$$F(|\xi_k|) = \frac{\xi_k}{(1 + |\xi_k|^{2p})^{1/2p}} \quad (2)$$

式中 P 为平滑因子,取值为 2~3。尽量避免较大程度的 OFDM 信号非线性失真,通常非线性功放维持在必要的线性取值之间^[11],然后再采取措施降低无线传感器网络的数据交换过程中的 PAPR 值。目前有不少专家和学者提出了各种各样的减少 OFDM 的 PAPR 的具体方法,大致可以归结为以下 3 种。一是信号预畸变技术。该方法对信号峰值进行压缩和扩展及限幅类操作,该方法简单,属于非线性,弊端就是频谱的弥散和带内噪声失真。二是编码类技术。这种技术的原来是将信息码字映射到传输码集上,不给峰值的码字出现的机会,技术实现起来比较复杂,是一种牺牲码率为代价的技术,速率降低的比

较快,复杂度比较高,比较适合较少的子载波的情况下;三是扰码类技术。这种方法与编码类技术有些差异,其完全避开信号峰值,并非从降低信号出现的概率去考虑的,利用线性实施过程,不会对信号产生畸变的负面影响,当然是增加了接收端和发射端的复杂程度来达到降低 PAPR 的目的。文中提出一种基于反转双曲正切 (Flipped-Inverse Hyperbolic Secant, FARCSECH) 脉冲成型技术 (FPS),即通过与 Nyquist 脉冲进行矩阵运算,并和最初数值序列进行求积,以实现增加子载波符号间的相关度的目的,达到实现减低 PAPR 的效果。

2 模型原理构造及脉冲集合产生

OFDM 发射机通信系统原理图如图 1 所示,正交子载波把基带信号 (PSK 或 QAM) 序列先进行串/并转化,经过进行基带调制,乘上 N 个成型脉冲,再进行子载波的调制。其中 $p_b (b=0, 1, \dots, N-1)$ 为每个子载波的调制数据,是不同的子载波的进行分别调制之后的具体数据值, f_b 是第 b 个频率下的子载波, $y_b(t)$ 可以表示时间周期为 T ,与子载波相互叠加 f_b 的成形脉冲。其中 OFDM 复数信号表达式为^[12]:

$$c(t) = p_0 y_0(t) \exp(i2\pi f_0 t) + p_1 y_1(t) \exp(i2\pi f_1 t) + \dots + p_{N-1} y_{N-1}(t) \exp(i2\pi f_{N-1} t) = \sum_{b=0}^{N-1} p_b y_b(t) \exp(i2\pi f_b t) \quad (3)$$

式中 $f_b = b/T$ 。 $c(t)$ 变换后的数值表达式,与 OFDM 具有共同的实部和虚部以及相位。

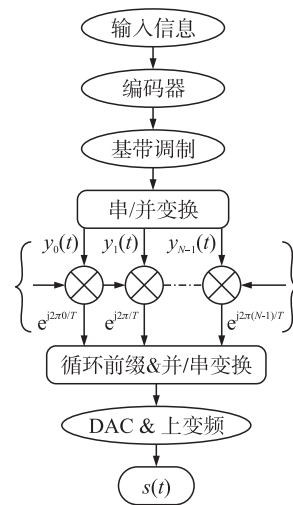


图 1 OFDM 发射系统原理图

反转双曲正切脉冲 (FARCSECH) 成型技术 (FPS) 的主旨思想就是将一个主脉冲信号通过移位和循环,使各个子载波合理避开峰值时出现,并按一定的算法形成脉冲集合,公式如下^[13]:

$$y_b(t) e^{i2\pi \frac{a}{T} t} = y_b(t - \tau_{a-b}) e^{i2\pi \frac{b}{T} (t - \tau_{a-b})}$$

$$a, b = 0, 1, \dots, N-1 \quad (4)$$

式中 $\tau_{a-b} = [(a-b) \bmod N] T_c, y_b(t) (b=0, 1, \dots, N-1)$ 为 Nyquist 脉冲, 具有 ISI 性质:

$$y_b(kT_s) = \begin{cases} 1 & k=0 \\ 0 & k \neq 0 \end{cases} \quad k \in Z \quad (5)$$

通过式(4)的各个子脉冲构成集合对应 OFDM 信息的最大的峰均功率比的表达式可以通过以下形式来表示:

$$\text{PAPR}_{\max} = \frac{1}{N} \max_{0 \leq t \leq T} \left(\sum_{n=0}^{N-1} |y_b(t)| \right)^2 \leq$$

$$\frac{1}{N} \left(\sum_{b=0}^{N-1} \max_{0 \leq t \leq T} |y_b(t)| \right)^2 = N \quad (6)$$

上面的式子的推导,利用了式(5)的乃奎斯特脉冲无码间干扰的性质,而且当且仅当是矩形脉冲是峰均功率比值最大为 N 。这个结论与式(27)也是相符合的,而且表明所有按上述方式构造的 Nyquist 脉冲集合都能用于 OFDM 信号的 PAPR 抑制。其中, $y_b(t) (b=0, 1, \dots, N-1)$ 是脉冲成型信号,其符号周期为 T 的时限信号,通过 Fourier 级数运算可以得到如下:

$$y_b(t) \approx \sum_{k=-K}^{N+K-1} s_{b,k} e^{i2\pi \frac{k}{T} t}, 0 \leq t \leq T \quad (7)$$

式中: $K = \lceil N\beta/2 \rceil; s_{b,k}$ 是 $y_b(t)$ 的傅里叶变换级数的系数;故

$$s_{b,k} = \frac{1}{T} \int_0^T y_b(t) e^{-i2\pi \frac{k}{T} t} dt = \frac{1}{T} y_b\left(\frac{k}{T}\right) \quad (8)$$

由式(4)和(7),可得到:

$$y_b(t) = \sum_{k=-K}^{N+K-1} s_{b,k} e^{-i2\pi \frac{bk}{N}} e^{i2\pi \frac{k-b}{T} t} \quad (9)$$

现由子载波总式(3)和式(9)联合得到

$$c(t) = \sum_{b=0}^{N-1} m_b d_b(t) e^{i2\pi \frac{b}{T} t} = \sum_{k=-K}^{N+K-1} n_k e^{i2\pi \frac{k}{T} t} = \text{IFFT}(n) \quad (10)$$

式中: $n = \sum_{b=0}^{N-1} m_b s_{b,k} e^{-i2\pi \frac{bk}{N}}; n = \{n_k\};$ 为包含 $N+2K$ 个元素的向量。并使 $y_{b,k} = s_{b,k} e^{-i2\pi \frac{bk}{N}} (b=0, 1, \dots, N-1, k=-K, \dots, N+K-1)$, 那么 $Y = (y_{b,i})$ 为 $N \times (N+2K)$ 的正交矩阵就称为成形矩阵,则 $n = mY$ 视为新矩阵。原来升余弦滚降脉冲在实践工程实验的比较多,表达式如下^[14]:

$$S_{\text{rcos}}(f) = \begin{cases} 1 & |f| \leq B(1-\alpha) \\ \frac{1}{2} \left\{ 1 + \cos \left[\frac{\pi}{2\alpha B} (|f| - B(1-\alpha)) \right] \right\} & B(1-\alpha) < |f| < B(1+\alpha) \\ 0 & |f| \geq B(1+\alpha) \end{cases} \quad (11)$$

$$S_{\text{rcos}}(t) = \frac{\sin(\pi t/T_s) \cos \pi \alpha t/T_s}{\pi t/T_s \sqrt{1-4\alpha^2 t^2/T_s^2}} \quad (12)$$

式中 $\alpha (0 \leq \alpha \leq 1)$ 为滚降系数。因为升余弦脉冲存在拖尾现象,出现定时颤抖,波形会出现左右偏移、起伏不定情况,给误码率提高带来不利的干扰。为了解决这个弊端我们在传统的基础上,引进改进的 Nyquist 脉冲即脉冲反转双曲正切脉冲(FARCSECH)^[15],其时域响应和频率响应公式如下所示:

$$S_{\text{farcsech}}(f) = \begin{cases} 1 & |f| \leq B(1-\alpha) \\ 1 - \frac{1}{2\alpha B r} \text{arcsech} \left(\frac{1}{2\alpha B} (B(1+\alpha) - |f|) \right) & B(1+\alpha) < |f| \leq B \\ \frac{1}{2\alpha \beta \gamma} \text{arcsech} \left(\frac{1}{2\alpha \beta} (|f| - B(1-\alpha)) \right) & B < |f| \leq B(1+\alpha) \\ 0 & B(1+\alpha) < |f| \end{cases} \quad (13)$$

时域表达式可以通过数值傅里叶反变换得到。其中 Nyquist 频率中的 $B = 1/2T, \alpha$ 为滚降因子,取值范围为 $0 \leq \alpha \leq 1, \gamma = \ln(\sqrt{3}+2)/\alpha B$ 。

无线通信系统中的通常用传输率和误码率来衡量信号质量的好坏,改进的成型脉冲成型(FPS)是实矩阵对称信号,类似于升余弦脉冲成型技术,都遵循 Nyquist 原则^[16],码间干扰会引起误码率的提高,从式(13)看出,改进的脉冲成型曲线旁瓣上升幅度比余弦的要小,脉冲矩形拖尾渐渐衰减,并不同的时刻叠加的采用数值对其他数值的干扰程度小的多。

3 FPS 抑制 PAPR 原理分析

OFDM 信号的 PAPR 为

$$\text{PAPR} = \max_{0 \leq t \leq T} |c(t)|^2 / E_{0 \leq t \leq T} [|c(t)|^2] \quad (14)$$

子载波相位叠加时,OFDM 峰值功率增大,PAPR 快速增加,若使子载波具有相关性,降低相位发生的概率,可以抑制 PAPR 的值,促使 OFDM 符号之间的相互关联函数^[17]及基带数据与成型脉冲函数如下:

$$R_c(t_1, t_2) = \sum_{b=0}^{N-1} \sum_{a=0}^{N-1} E [d_b d_a^*] y_b(t_1) y_a^*(t_2) \cdot \exp [i2\pi (bt_1 - bt_2)/T] \quad (15)$$

检验相互关联函数,从 OFDM 采样值角度考虑,引入信息编码编程实现数据之间的相关性;该方法不但引入冗余信息,带来带宽效率降低的结果同时采用成型技术子载波进行成型处理,引入子载波的波间的相关性,这样既不影响子载波正交性,也不影响系统带宽效率,同时保持带外的信息不变化,故采用类似的脉冲成型波形将式(15)推导如下:

$$R_c(t_1, t_2) = \delta^2 \sum_{b=0}^{N-1} \sum_{a=0}^{N-1} E[p_b p_a^*] y_b(t_1) y_a^*(t_2) \cdot \exp[i2\pi(bt_1 - at_2)/T] = \begin{cases} \delta^2 N^2 y(t_1) y(t_2) & t_1 = t_2 \\ \delta^2 y(t_1) y(t_2) \left(\frac{1 - e^{i2\pi t_1 N/T}}{1 - e^{i2\pi t_2/T}} \right) & t_1 \neq t_2, \end{cases} \quad (16)$$

计算式子的 $E[|d_n|^2] = \delta^2$. 从以上表达式中可得出如下情况:在数值采样的某个点 $k_c (k \in Z)$ 上,彼此互相关的函数的值一致为零。因为 OFDM 的符号位存在 N 个随机分布的高斯变量,我们从相关性的角度出发来解释 PAPR 的出现概率,采用了成型脉冲对子载波处理不影响采样值的相关性,但无疑提高了信号传输的瞬时幅度,必然致使 PAPR 有骤然增高的现象。若采用相同成型脉冲,式(14)的最大值为

$$PAPR_{\max} = \frac{1}{N} \max_{0 \leq t \leq T} \left(\sum_{n=0}^{N-1} |x(t)| \right)^2 = N \max_{0 \leq t \leq T} |x(t)|^2 \quad (17)$$

由等能量的条件,有

$$\int_0^T |x(t)|^2 dt = T \leq \max_{0 \leq t \leq T} |x(t)|^2 T \quad (18)$$

将式(18)代入式(17),子载波的成型脉冲可以这样表示,即 $x_n(t) = x(t) (n=0, 1, \dots, N-1)$, 则 OFDM 信号 PAPR 的最大值满足

$$PAPR_{\max} \geq N \quad (19)$$

表达式(18)可以得出结论,若上面的计算的成型脉冲符合 $\max_{0 \leq t \leq T} |x(t)|^2$, 这时峰均功率比 PAPR 的最大值就达到它的最小下界 N , 同样可以理解为式(19)给出的只有反转双曲线正切脉冲能达到这个抑制下界也不是很全面的,应该说这只是其中的一种类型。另外,不同的子载波可以采用截然不同的脉冲技术,于是式(15)就可以改进为

$$R_s(t_1, t_2) = \delta^2 \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{N-1} x_n(t_1) x_m^*(t_2) \cdot \exp[j2\pi(nt_1 - mt_2)/T] \quad (20)$$

从上面可以看出来,相关性取决于子载波脉冲波形形状,因此采样合适成型技术,增加采样点的相关性,就能建设 PAPR 的值。若采用不同的 FPS 技术,式(14)的最大值为

$$PAPR_{\max} = \frac{1}{N} \max_{0 \leq t \leq T} \left(\sum_{b=0}^{N-1} |v(t - bT_c)| \right)^2 = \frac{1}{N} \left(\sum_{b=0}^{N-1} |v(bT_c)| \right)^2 \quad (21)$$

对于较大子载波次数 N , 有

$$\sum_{b=0}^{N-1} |v(bT_c)| = \frac{N}{T^2} \int_0^T |v(t)| dt \quad (22)$$

则式(21)变为

$$PAPR_{\max} = \frac{N}{T^2} \left(\int_0^T |v(t)| dt \right)^2 \quad (23)$$

可得

$$\left(\int_0^T |v(t)| dt \right)^2 \leq T \int_0^T |v(t)|^2 dt = T^2 \quad (24)$$

将表达式(24)代入关系式(23)中,当不同的子载波采用不同的系列的 FPS 集合,也就是 $\{y_0(t), y_1(t), y_2(t), \dots, y_{N-1}(t)\}$, 同时

$$y_b(t) = \begin{cases} v(t - bT_c) & 0 \leq t \leq T = NT_c \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (25)$$

式中 $v(t)$ 为周期和能量为 T 的周期信号, 即有

$$\int_0^T |v(t)|^2 dt = T \quad (26)$$

且正交频分复用信号的最大峰均功率比可以满足

$$PAPR_{\max} \leq N \quad (27)$$

式子成立,应该取等号。从式(24)可以看出,若要使用矩阵脉冲,OFDM 的 PAPR 达到上限,OFDM 就回归到一般的系统。若要采用不同的成型脉冲技术对各个子载波将降低峰值幅度,就可以达到对整个系统的 PAPR 减小的目的。

4 仿真结果及讨论

系统峰均功率值(PAPR)会随着调制阶次的升高而增加,由于脉冲频谱采用复数形式表示,PAPR 可以通过不同调制模式效果对比。通过系统仿真,可以获得载波数为 128、滚降系数 $\alpha = 0.3$ 情况下调制模式分别选择 128QAM、64QAM、16QAM、BPSK 和 QPSK 时利用 FPS 技术系统出现的 PAPR 的互补累计分布函数(CCDF)曲线,如图 2 所示;可以看出 QPSK 可以带来 4 dB 以上的改善,故其比较适合应用在该系统中。

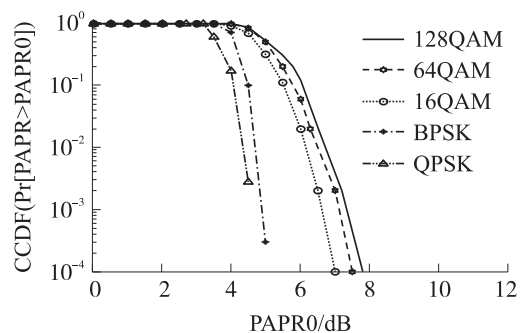


图 2 不同调制方式 OFDM 信号的 CCDF

通过查阅参考文献,绘制出 OFDM 信号的 PAPR 的 CCDF 曲线图,如图 3。图中可以看出原始信号、限幅法^[18]、随机 8 路相位 SLM^[19]、Raised

Cosine (Rcos) 和差分回归^[20] (Recursive Scheme, Recus) 和本文提及改进的 FPS 方法对比效果图,其中载波数 N 仍为 128,滚降系数为 0.3,调制模式为 QPSK。从图中可以看出,与常用的差分回归进行比较,基于 Nyquist 改进的 FPS 方法可以对 OFDM 的 PAPR 峰值有较大的改进;其中脉冲的类型与 PAPR 信号的改善也有很大的关系,例如与升余弦相比, FPS 这种方法改善性能更好,原因是其能较好产生良好的抗 ISI 特性,具有较小的幅度旁瓣。通过这里比较可以得出,改善 OFDM 的信号除了本方法还有其他方法也适用。

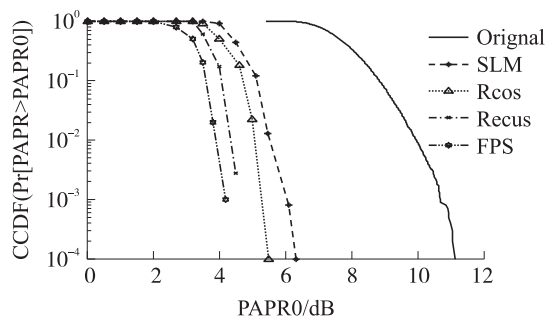


图3 基于 FPS 整形的 OFDM 信号的 CCDF

采用反转双曲正切脉冲成型技术 (FPS) 的 OFDM 的 CCDF 仿真分布图走势会随着 α 的不同而不同,滚降系数 α 分别为 0.1、0.3、0.35 和 0.5,滚降系数决定拖尾衰减的速度的大小,即系数大,衰减幅度越大,从图 4 可以看出,不同的滚降系数下的峰均功率比 PAPR 的曲线走向并不相同,滚降系数越大改善的效果越好。抗 ISI 性能越强;说明同一时刻 OFDM 个子载波概率较小,对 PAPR 影响较小,抑制效果较理想。

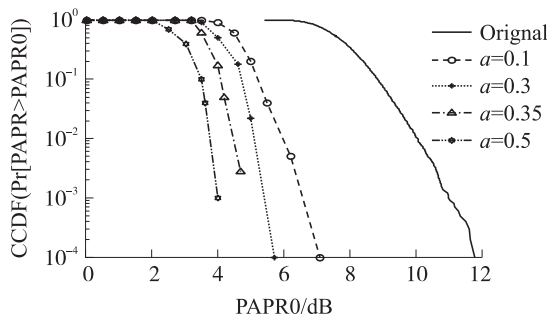


图4 不同滚降系数下的 CCDF 对比图

目前用来衡量系统性能指标多用误码率 (BER) 来表示,借助 Matlab 工具软件编程模拟仿真可得系统的误码率的性能,经过图形对比可以看出,基于奈奎斯特 (Nyquist) 脉冲成型 FPS 技术可以使系统的误码率得到了改善,在误码率 10^{-2} 时信噪比有 6 dB 提高,效果明显,如图 5 所示。

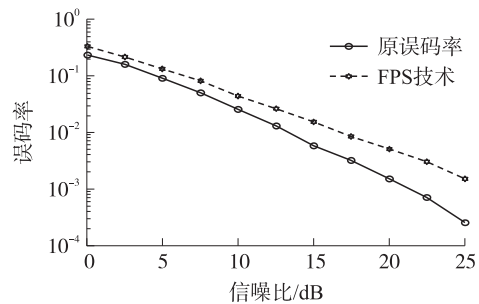


图5 基于 FPS 通信系统性能仿真

5 结束语

为了减少无线传感器网络的通信中 PAPR,引入反转双曲正切脉冲成型技术 (FPS),通过构造系统和采用不同方法改善 PAPR 并进行对比,结果发现该方法复杂度不高,整体运算量小,能实现实时性传输和信息流量的控制,不受特性情况制约,适合超宽带技术下 WSNs 系统通信设计与应用,且整体性能简单优越,具有一定的推广价值。

参考文献:

- [1] 蒋敏兰,陆鑫潮.一种新型的无线传感器网络覆盖算法[J].传感技术学报,2012,25(8):1112-1115.
- [2] 吴宣够.基于压缩感知的大规模无线传感器网数据收集研究[D].合肥:中国科技大学,2013.
- [3] 张仕明,陈伟民,章鹏,等.无线应变测量节点的精度与功耗综合分析[J].传感技术学报,2012,25(9):1289-1293.
- [4] Duc Minh Pham, Syed Mahfuzul Aziz. Object Extraction Scheme and Protocol for Energy Efficient Image Communication over Wireless Sensor Networks[J]. Computer Networks, 2013 (57): 2949-2960.
- [5] 刘文平.无线传感器网络中基于骨架的路由协议[J].计算机应用研究,2010,27(12):4670-4672.
- [6] 谭冲.无线多媒体传感器网络最优化资源分配与传输技术研究[D].上海:上海大学,2012.
- [7] 朱晓亮.无线传感器网络实时媒体传输速率控制机制[J].小型微型计算机系统,2007,28(2):199-203.
- [8] 高建勤,熊淑华.正交频分复用(OFDM)原理及其实现[C]//四川省通信学会二零零四年学术年会论文集(二),2004:35-38.
- [9] Aburakhia S A, Badran E F. Linear Companding Transform for the Reduction of Peak-to-Average Power Ratio of OFDM Signals[J]. IEEE Trans on Broadcasting, 2009, 55(1): 155-160.
- [10] Chen Han-Chiang, M Y. Implementation of SOPC Based Telecom and Datacom for Monitoring Wireless Sensor Networks [J]. Telecommun Syst, 2013 (352): 2325-2333.
- [11] 刘文平.无线传感器网络的拓扑特征提取与应用研究[D].武汉:华中科技大学,2012.
- [12] Jesús Lúzaró, Armando Astarloa. I²C_{Sec}: A Secure Serial Chip-to-Chip Communication Protocol[J]. Journal of Systems Architecture, 2011(57): 206-213.
- [13] 孔德彭,张国平,李美燕,等.一种降低 OFDM 系统峰均功率比

- 的差分回归法研究[J]. 通信学报,2009,30(12):120-127.
- [14] 张士兵,张力军. 多带 OFDM-UWB 系统峰均功率比降低方法研究[J]. 电路与系统学报,2006,11(6):50-55.
- [15] Olfat M, Liu K J R. Recursive Construction of 16-QAM Super-Golay Codes for OFDM Systems [J]. IEEE International Conference on Communications,2003(5):3387-3391.
- [16] Antonio Assalini. Improved Nyquist Pulses [J]. IEEE Communication Letters,2004,8(2):87-89.
- [17] Zhang W, Xia X G, Khaled B L. Space-Time/Frequency Coding for MIMO-OFDM in Next Generation Broadband Wireless System[J]. IEEE Trans Wireless Commun,2007,14(6):32-43.
- [18] Nikooar H, Lidsheim K S. Random Phase Updating Algorithm for OFDM Transmission with Low PAPR [J]. IEEE Trans on Broadcasting,2002(48):123-128.
- [19] Yuen C, Guan Y L, Tjhung T T. Power-Balanced Orthogonal Spacetime Block Code [J]. IEEE Trans on Vehicle Technology, 2008,57(5):3304-3309.
- [20] Shahabeddin Geravand, Mahmood Ahmadi. Bloom Filter Applications in Network Security: A State-of-the-Art Survey [J]. Computer Networks,2013(57):4047-4064.
- [21] Xueying Zhang, Heys H M, , et al. FPGA Implementation and Energy Cost Analysis of Two Light-Weight Involutional Block Ciphers Targeted to Wireless Sensor Networks [J]. Mobile Netw Appl,2013(18):222-234.



孔德彭(1976-),男,河南唐河人,研究生,博士,浙江工业大学教师,系统架构设计师(副高),主要研究方向为无线传感器信号处理,siweikon@126.com;



周国华(1993-),男,杭州人,本科,在校,研究方向传感器技术研究、混沌加密研究,ethenzhou@126.com。