

典型超宽带通信系统实现方案的应用场景分析

赵 亮,金 梁,刘双平,季中恒,禹春来

(国家数字交换系统工程技术研究中心,河南郑州 450002)

摘 要: 目前虽然存在很多超宽带通信系统实现方案,但对这些方案的综合性能评价和应用场景分析方面的研究较少.本文介绍了超宽带技术的研究现状,分析了其潜在的应用场景,并给出了超宽带通信系统的实现方案模型.通过对超宽带通信系统中基带调制、抗多径处理、扩频和载波变频这四类技术的研究和应用场景分析,以通信速率、通信距离、实现复杂度和功耗为主要评价标准,给出了12种满足功率谱密度限制和6种不满足功率谱密度限制的典型超宽带通信系统实现方案的应用场景.这些研究对超宽带通信系统的优化设计和多元化发展具有重要意义.

关键词: 超宽带通信系统; 实现方案; 应用场景; 通信速率; 通信距离

中图分类号: TN914 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2011) 09-2154-08

Analysis on the Application Scenarios of Typical Implementation Schemes for Ultra-Wideband Communication System

ZHAO Liang, JIN Liang, LIU Shuang-ping, JI Zhong-heng, YU Chun-lai

(National Digital Switching System Engineering & Technological R&D Center, Zhengzhou, Henan 450002, China)

Abstract: Although there are many implementation schemes for the ultra-wideband communication system now, there are not many researches done on the comprehensive performance evaluation and application scenario analysis. This paper describes the research status of the ultra-wideband technology, analyzes its potential application scenarios, and presents the implementation model for the ultra-wideband communication system. Based on the researches and application scenario analysis of baseband modulation, anti-multipath processing, spread spectrum and frequency carrier technologies in the ultra-wideband communication system, and taking the communication rate, communication distance, implementation complexity and power consumption as the main evaluation criteria, this paper provides the application scenarios of typical implementation schemes for the ultra-wideband communication system, including 12 kinds which meet the power spectrum density limit and 6 kinds which do not. The researches are significant in the optimized design and diversified development for the ultra-wideband communication system.

Key words: ultra-wideband communication system; implementation schemes; application scenarios; communication rate; communication distance

1 引言

2002年, FCC(Federal Communications Commission, 美国联邦通信委员会)批准超宽带技术进入民用领域, 规定超宽带信号为 -10dB 分数带宽大于20%或 -10dB 绝对带宽大于500MHz的无线电信号, 在3.1GHz至10.6GHz的频段内的等效全向辐射功率谱密度限制在 $-41.3\text{dBm}/\text{MHz}$ 以下, 功率谱峰值部分的50MHz带宽内的发射功率限制在 0dBm 以下, 而在其它频段实行更严格的限制标准^[1]. 经过各研究机构和公司数年的研究

开发, 新技术和系统方案不断涌现, 数以百计的超宽带通信演示系统和芯片组相继问世, 相关的IEEE 802.15.3a提案^[2]以及IEEE 802.15.4a^[3]、ECMA 368/369^[4]等标准也相继出台. 但是, 严格的功率谱密度限制并不能保证超宽带通信的电磁兼容性能, 相对较低的理论信道容量、较高的处理损耗和严重的频率选择性衰落等因素大大限制了超宽带系统的通信距离和通信速率, 高速通信系统的高实现复杂度和高功耗也制约了超宽带技术的推广应用. 这些因素导致超宽带通信系统在很多应用场景较之其它通信系统并没有足够的优势.

另外,由于早期主要应用于军事领域的超宽带通信并没有对发射功率进行限制,所以目前一些国家在军事、公安和救援等一些特殊应用领域仍然允许超宽带通信系统的发射功率超过功率谱密度限制,以实现更远的通信距离.同时,认知无线电技术通过频谱检测感知接入协议,可以在时间上和空间上充分利用频谱资源,是当前得到广泛认可和深入研究的新技术.将认知无线电技术应用于超宽带通信,可以在保证超宽带通信电磁兼容性能的条件下摆脱功率谱密度限制,从而有效增加超宽带系统的通信距离和通信速率,拓展其应用场景^[5].

由于不同超宽带通信系统实现方案的应用适应性存在很大差别,虽然多种物理层方案的共存并不利于标准化应用,但这也是拓展超宽带通信应用场景的必然选择.要发挥超宽带通信的优势,必须寻找有价值的突破点,将各种超宽带技术进行最优化组合以适用于特定的应用场景.大部分现有超宽带通信系统实现方案都具有应用场景的针对性,但其分析往往不全面,不同实现方案之间也缺乏公平合理的比较.本文根据现有研究成果,以通信速率、通信距离、实现复杂度和功耗为主要评价标准,综合分析了基带调制、抗多径处理、扩频和载波变频这四类超宽带技术的应用场景.以此为基础,根据超宽带通信系统的链路预算和抗多径处理能力,给出了 12 种满足功率谱密度限制和 6 种不满足功率谱密度限制的典型超宽带通信系统实现方案的应用场景.

2 超宽带通信系统的潜在应用场景分析

现有的典型地面无线通信系统的应用场景如图 1 所示.

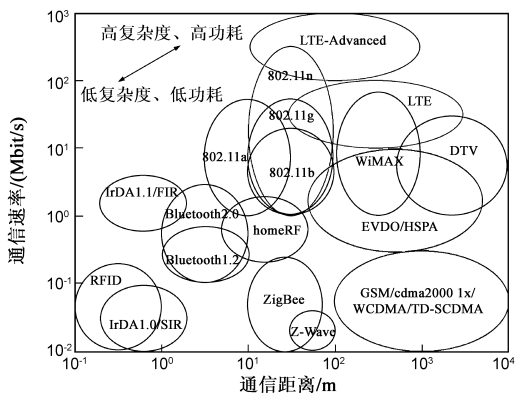


图1 现有的典型地面无线通信系统的应用场景

由图 1 可以看出,由于单一的无线通信系统实现方案难以适用于多种应用场景,所以需要多种无线通信技术的共存,以满足不同的应用需求.对于满足功率谱密度限制的超宽带通信系统而言,其潜在应用场景除

了包括目前主流应用的 1m 至 20m 近距离高速通信之外,还包括小于 1m 的近场高速通信^[6]、20m 至 100m 的较近距离的低速通信^[7]以及低复杂度和低功耗的近距离低速通信^[3].同时,如果不满足功率谱密度限制,超宽带通信系统也可以实现超过 100m 的远距离通信.相对于其它无线通信系统而言,其主要优势体现在低复杂度、低功耗、抗干扰和抗截获等方面,但要得到广泛应用则需要相关政策和标准的支持.

3 超宽带通信系统的实现方案模型

目前的超宽带通信系统实现方案的种类很多,为了对其进行有效的分类和评估,建立了超宽带通信系统的实现方案模型,如图 2 所示.该模型由很多模块组成,可以根据实际需求对各模块进行组合,形成不同的超宽带通信系统的实现方案,且各模块是否进行配置以及所处的位置均可进行调整.

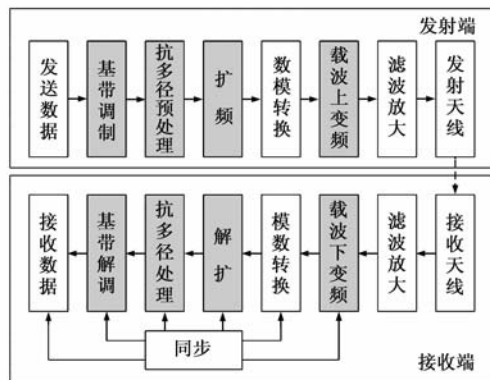


图2 超宽带通信系统的实现方案模型

可以看出,超宽带通信系统的特征主要由基带调制、抗多径处理、扩频和载波变频这四种技术方案决定^[8].其中,基带调制方式主要包括 PAM、PPM、OOK、PSK、FSK、BOK 和 QAM,抗多径处理方式主要包括 RAKE、TDE(Time Domain Equalization,时域均衡)、OFDM 和 FDE(Frequency Domain Equalization,频域均衡),扩频方式主要包括 DSSS(Direct Sequence Spread Spectrum,直接序列扩频)、THSS(Time Hopping Spread Spectrum,跳时扩频)、FHSS(Frequency Hopping Spread Spectrum,跳频扩频)和 CSS(Chirp Spread Spectrum,线性调频扩频),载波方式主要包括 CF(Carrier Free,无载波)、SC(Single Carrier,单载波)和 MC(Multi-Carrier,多载波)。

4 四类超宽带通信技术的应用场景分析

4.1 基带调制

基带调制使用基带信号承载发送的数据信息,主要包括 PAM、PPM、OOK、PSK、FSK、BOK 和 QAM.这几种调制方式在 AWGN 信道中误比特率达到 10^{-2} 和 10^{-3} 所需的比特信噪比和频谱利用率如表 1 所示,其中 PPM

采用正交调制, BOK 采用三进制正交码调制^[2].

表 1 不同调制方式达到特定误比特率所需的
比特信噪比和频谱利用率

调制方式	所需的比特信噪比 (dB)		频谱利用率 (bit/s/Hz)
	误比特率 为 10^{-2}	误比特率 为 10^{-3}	
64BOK(32 位正交序列)	2.4	4.1	6/32
16BOK(24 位正交序列)	3.0	4.9	4/24
8BOK(24 位正交序列)	3.4	5.4	3/24
4BOK(24 位正交序列)	3.8	6.1	2/24
64PPM	3.4	4.6	6/64
16PPM	3.9	5.3	4/16
8PPM	4.4	6.3	3/8
4PPM	5.4	7.5	2/4
2PPM	7.3	9.8	1/2
2PAM/BPSK/2BOK	4.3	6.8	1
OOK/2FSK	7.3	9.8	1
4PAM	7.9	10.5	2
8PAM	12.0	14.8	3
16PAM	16.4	19.4	4
QPSK/DQPSK	4.3	6.8	2
8PSK	7.2	10.0	3
16QAM	7.9	10.4	4
64QAM	11.9	14.7	6

可以看出, 频谱利用率越高, 达到特定误比特率所需的比特信噪比就越高, 所以调制方式的选择首先是通信速率与通信距离的折中, 这导致不同调制方式的应用场景存在较大差别.

对于低复杂度的低通信速率应用而言, 超宽带通信系统一般使用非相干解调, 使用能量检测或自相干接收的方案简化收发信机设计^[9]. 目前常用的调制方式包括 OOK、DQPSK、2FSK、PPM 和 BOK 等, 其中 OOK 的设计最简单, DQPSK 和 2FSK 次之, 但它们都对时延抖动和多径效应较为敏感. 而具有高扩频增益的 PPM 和 BOK 调制虽然设计较为复杂, 频谱利用率低, 但可获取比普通扩频方案更高的功率效率, 且具有更好的抗多径性能^[8].

对于高复杂度的高通信速率应用而言, 超宽带通信系统一般使用相干解调以获取更高的系统性能. 目前常用的调制方式包括 2PAM、BPSK 和 QPSK 等. 同时, 也有人提出使用 MPAM ($M > 2$)、16QAM 或 64QAM 等高阶调制方式提高频谱利用率, 以更好地适用于未来超过 1Gbit/s 通信速率的应用需求^[10,11]. 但这些都是以提高系统复杂度为代价的, 对同步、信道估计和抗多径处

理都提出了较高的要求.

4.2 抗多径处理

在无线通信中由于存在多径时延扩展, 产生符号间干扰, 特别在通信速率较高时更为严重. 采用脉冲持续周期为 0.5ns 的半余弦脉冲作为基带信号, 不使用抗多径处理方案且使用基于能量检测的非相干解调, 则在理想同步和无噪声的条件下, CF-THSS-2PPM 超宽带通信系统在 IEEE 802.15.3a 的四种信道模型下的通信速率与误比特率的关系如图 3 所示, 仿真中使用了 10000 个信道冲激响应的实现^[12].

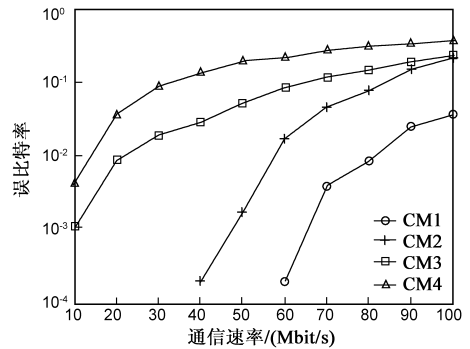


图3 IEEE 802.15.3a信道模型下通信速率与误比特率的关系

由图 3 可以看出, 如果不进行抗多径处理, 则在较差的传输环境下超宽带近距离通信系统的通信速率一般低于 10Mbit/s, 而面对远距离通信中更为复杂的频率选择性衰落信道, 系统的可达通信速率将更低. 为了获得更高的通信速率与更远的通信距离, 需要进行信道估计和抗多径处理, 主要方法包括 RAKE、TDE、OFDM 和 FDE.

为了达到较好的性能, 一般要求 RAKE 接收机具有较高的时间分辨率, 即需要 16 个以上的抽头数, 而由于 RAKE 接收机的实现复杂度与抽头数成正比, 导致设计难度较大. 并且单一的 RAKE 多径选择与合并算法的适用性有限, 往往不能适应复杂多变的超宽带信道环境.

TDE 利用波形补偿校正由于基带特性不理想引起的波形畸变, 使校正后的波形在采样判决时刻的符号间干扰最小化, 具体可分为线性均衡和非线性均衡. 在超宽带通信系统中常用的线性均衡主要为 MMSE (Minimum Mean-Square Error, 最小均方误差) 均衡, 非线性均衡主要包括 DFE (Decision Feedback Equalize, 判决反馈均衡) 和 Turbo 均衡^[13,14]. 在恶劣信道下为了补偿信道频率响应的深度衰落, 线性均衡对某频段提高增益的同时也放大了噪声, 而以 DFE 为代表的非线性均衡中由于存在不受噪声增益影响的反馈部分, 因而性能优于线性均衡, 但在高速通信应用中实现复杂度较高. 与 RAKE 接收机类似, TDE 的实现复杂度与抽头数成正比, 所以更适合以较少的抽头数进行简单的抗多径处

理,其在低信噪比条件下的优良表现使其更适用于远距离低速通信。

使用 OFDM 技术时高速串行数据流被分成若干低速并行子数据流,每个子数据流具有较长的符号周期,只要时延扩展小于保护间隔长度,就不会产生符号间干扰。但由于需要进行串并转换、插入导频和循环前缀以及快速傅里叶变换,实现复杂度较高^[15]。由于 OFDM 系统每个子载波的符号周期较长,并引入了保护间隔,所以对时间同步的要求不高。但由于 OFDM 系统中收发晶振的频率偏差和多普勒频移导致的载波频率偏移会破坏正交性而产生子载波间干扰,而载波相位噪声则会导致码元星座点的旋转和扩散,所以虽然使用了循环前缀,对载波同步中频率合成器的要求仍然很高,仅 1% 的频偏就会使信噪比下降 30dB^[16]。同时,OFDM 符号由多个独立的经过调制的子载波信号叠加而成,峰均功率比较高,在不满足功率谱密度限制时将功率放大器的指标提出较高的要求^[17]。

FDE 通过已知的训练序列或导频信号进行信道估计,利用可调滤波器的频率特性补偿实际信道下通信系统的幅频和相频特性的畸变,在超宽带通信系统中常使用 MMSE 均衡、MAP(Maximum A Posteriori Probability,最大后验概率)均衡和 MLE(Maximum Likelihood Estimation,最大似然估计)均衡^[18]。FDE 的实现复杂度与抽头数的对数成正比,在大部分条件下即使考虑高速 FFT 和 IFFT 变换,在抽头数较多时其复杂度也往往远低于 TDE,所以更适用于对抗恶劣的信道环境。由于 FDE 在信噪比较低时性能劣于 TDE,在信噪比较高时性能优于 TDE,所以更适用于近距离高速通信^[19]。

4.3 扩频

超宽带系统虽然带宽很宽,但发射功率有限,所以有效通信距离主要取决于系统的扩频增益。超宽带扩频方案主要包括 DSSS、THSS、FHSS 和 CSS。

DSSS 系统由于码片速率较高,需要高采样率的模数转换器 and 高速信号处理单元,导致在相同扩频增益下其实现复杂度和硬件成本相对较高^[20],所以现有系统中 DSSS 的扩频增益一般较低。DSSS 的优点在于时域信号连续,峰均功率比低,对功率放大器要求不高,在未发生瞄准式干扰时其干扰效果可等效为高斯白噪声,电磁兼容性能较好^[21]。

THSS 是目前 IEEE 802.15.4a 标准中的脉冲超宽带通信系统所采用的主要扩频方案,可以实现很高的扩频增益,且实现复杂度和功耗很低^[22]。由于其信号占空比很低,虽然在低信干比时电磁兼容性能很好,但在高信干比时电磁兼容性能很差。因其对带宽较窄的其它通信系统干扰相对较弱,所以 FCC 的峰值功率谱密度

限制对其扩频增益的限制并不严格^[1,21]。而由于在同样发射功率下高扩频增益的 THSS 系统的功率放大器需要更高的动态范围,实现难度较大,导致单独使用 THSS 难以适应无功率谱密度限制的超宽带远距离通信。

FHSS 系统中信号的能量在较窄的带宽内集中,虽然在低信干比时电磁兼容很好,但在高信干比时电磁兼容性能很差。由于其对带宽较窄的其它通信系统干扰相对较强,FCC 的峰值功率谱密度限制对 FHSS 的扩频增益有严格要求,所以 FHSS 一般需要与其它扩频方案结合使用^[1,4,21]。

CSS 系统中信号的能量在时域和频域上被同时展宽,信号峰均功率比很低,功率放大器设计简单,电磁兼容性能在被干扰通信系统带宽较宽时类似于 FHSS,在被干扰通信系统带宽较窄时类似于 THSS,综合性能较好^[21]。另外,线性调频信号的产生可以使用低成本、低功耗的 SAW(Surface Acoustic Wave,声表面波)器件实现,实现复杂度很低,并且信号在接收端通过时域脉冲压缩进行匹配滤波可以获得极高的处理增益。但目前 SAW 器件产生线性调频信号的中心频率、带宽和信号稳定性等参数指标有限,对脉冲压缩后的超宽带窄脉冲信号的高采样率模数转换将增加系统的复杂度和功耗,也给定同时同步带来了很大困难^[23-25]。一种有效的解决方法是使用直接数字频率合成器完成信号产生和提供参考模板,在接收端的模拟电路部分利用参考模板进行去斜脉冲压缩,然后对压缩后的窄带信号进行模数转换,这样不仅可以大幅度降低接收端的采样速率和信号处理规模,还可以获得更高的扩频增益,在远距离低速通信中具有较高的应用价值。

4.4 载波变频

对于超宽带通信而言,由于不需要使用中频,所以载波变频一般由模拟电路实现,直接影响系统设计的复杂度和设备的稳定性。载波变频主要包括 CF、SC 和 MC 三种。

CF 系统由于发射的脉冲信号或线性调频信号未经载波调制,直接在基带处理,不需要载波频谱搬移和载波同步,实现复杂度和功耗最低。但脉冲信号稳定性较差,高速应用的成本较高,产生的高斯脉冲、厄密特脉冲、升余弦脉冲或半余弦脉冲等基带窄脉冲信号包含较多的低频分量,在满足功率谱密度限制时发射功率损失严重^[8]。而如果对以上脉冲采用增加脉冲的微分次数、修正脉冲成形因子或将多个脉冲信号组合等方式,则会大大增加脉冲发生器的设计复杂度,且提升效果有限^[26,27]。例如当脉冲成型因子 $\alpha = 0.714\text{ns}$ 或 $\alpha = 0.314\text{ns}$ 时,超宽带系统中常用的高斯脉冲信号的 1 至 15 阶导数的功率谱如图 4 所示^[28]。

同时,由于硬件指标的问题,目前 SAW 器件产生的

线性调频信号如果不经载波变频,在满足功率谱密度限制的条件下发射功率损失更为严重,且扫频周期一般较长,不适合高速应用^[24].另外,由于CF系统经过匹配滤波后的脉冲信号时间宽度很窄,即使出现很小的时间抖动或脉冲跟踪偏差,也会导致系统吞吐量的明显降低,所以对时间同步的精度要求很高.

SC系统通过对基带信号进行载波频搬移,可以有效解决CF系统存在较多低频分量的问题,但要满足带宽要求,仍然需要进行必要的脉冲成型.与CF系统类似,SC系统对时间同步的要求较高,仅在扩频码较长时对定时精度的要求可降低^[29,30].

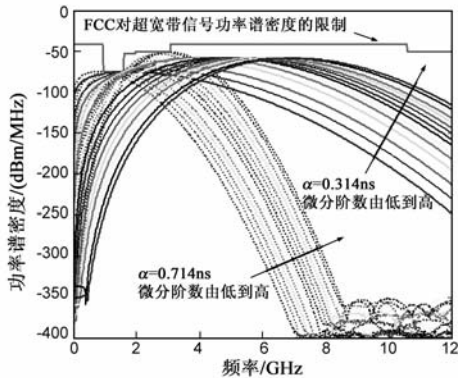


图4 高斯脉冲信号的1至15阶导数的功率谱

MC主要应用于基于OFDM的超宽带通信系统,其性能在上文已经进行了分析.如果不使用OFDM技术,MC系统虽然仍具有较好的抗多径能力,但同样会面临载波同步与高峰均功率比等方面的问题.并且如果发送端不进行IFFT变换,则一般需要使用高成本的多振荡源和带通滤波器组,且对每路载波分别进行信号处理的效率很低,需要进一步研究将多路运算转化为矩阵运算的有效方法^[31,32].

5 超宽带通信的链路预算分析

设超宽带信号的带宽为1.25GHz,中心频率为5GHz.根据实测结果,对小于1m的通信距离取参考距离为0.1m,且考虑非视距传播和小尺度衰落等影响因素,其路径损耗因子一般为 $2 \leq \gamma \leq 3$ ^[33].对大于1m的通信距离取参考距离为1m,且路径损耗因子一般为 $2 \leq \gamma \leq 4$ ^[34].若仅考虑自由空间传播损耗,可得出理想条件下的链路预算.如果考虑天线损耗、系统噪声损耗、系统处理损耗以及有限的调制效率和编码效率,接收机要实现低误比特率解调需要大约20dB的信噪比裕量^[5],若将其与路径损耗合并,可得出实际条件下的链路预算.另外,文献^[35]通过大量的实际测试,给出了1m至20m通信距离下视距和非视距传输的链路预算模型.设在满足功率谱密度限制时超宽带通信系统发射

信号的功率谱密度为 $-41.3\text{dBm}/\text{MHz}$,则发射功率为 $93\mu\text{W}$.考虑到干扰温度和功率放大器设计复杂度的限制,设不满足功率谱密度限制时超宽带通信系统发射信号的功率谱密度为 $8.7\text{dBm}/\text{MHz}$,则发射功率为 9.3W .在这些条件下,满足和不满足功率谱密度限制时超宽带通信系统的通信速率与通信距离的关系如图5所示.可以看出,视距和非视距传输条件下的链路预算分别接近于 $\gamma=2$ 和 $\gamma=4$ 时的链路预算.

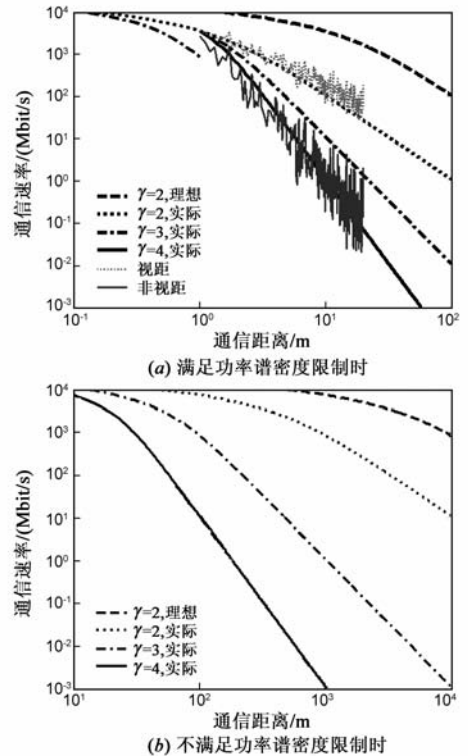


图5 超宽带通信系统的通信速率与通信距离的关系

6 典型超宽带通信系统实现方案的应用场景

由于发射功率有限,超宽带通信系统要实现更远的通信距离,需要降低通信速率.在发射功率一定的条件下,虽然超宽带通信系统的链路预算决定了其通信距离和通信速率的基本关系,但各种实现方案又具有不同的特征,其抗多径处理能力、可实现的扩频增益和具体硬件设计等因素使其仅在某一个通信速率与通信距离区间内可以实现性能、实现复杂度与功耗的最佳折中,从而在实际应用中取得优势.采用这种分析方法,在满足 $-41.3\text{dBm}/\text{MHz}$ 的功率谱密度限制时,12种典型超宽带通信系统实现方案的应用场景如表2所示.在发射信号的功率谱密度为 $8.7\text{dBm}/\text{MHz}$,即不满足功率谱密度限制时,本文所提出的6种典型超宽带通信系统实现方案的应用场景如表3所示.需要说明的是,给出的通信距离与通信速率仅考虑使用全向天线的点对

点通信,而不考虑使用多天线或定向天线的情况。

表 2 满足功率谱密度限制时典型超宽带通信系统实现方案的应用场景

序号	典型超宽带通信系统实现方案	通信距离 (m)	通信速率 (Mbit/s)	实现复杂度 芯片面积 (mm ²) /工艺 (nm)	功耗 最大功耗 (mW) /工艺 (nm)	说明
1	CF-THSS-OOK/2PPM /2PAM ^[6,26,33,36]	极近, 0.1 – 1 ^[6,33]	较高, 0.5 – 100 ^[26,33]	很低, 0.6/90 ^{RP} ^[36] , 4.42/180 ^R ^[26]	较低, 238/90 ^{RP} ^[36] , 161/180 ^R ^[26]	已芯片化,适用于无线体域网的低速应用
2	CF-THSS-RAKE – 2PPM/BPSK ^[3,22,37]	较近, 10 – 50 ^[22,37]	很低, 0.01 – 10.7 ^[22,37]	较低, 25/180 ^R ^[37] , 8.4/90 ^P ^[22]	很低, 38/180 ^R ^[37] , 8.7/90 ^P ^[22]	已芯片化, IEEE 802.15.4a 标准,适用于工业无线通信和无线传感器网
3	CF-THSS/CSS-2BOK ^[25,38]	极近, 0.2 – 2	极低, 0.001 – 0.1 ^[38]	极低, 0.5 ^R /SAW ^[38]	极低, 0.1 ^R /SAW ^[38]	已芯片化,适用于 RFID
4	SC-THSS-RAKE – 2PPM/BPSK ^[3,29,39,40]	较近, 5 – 50 ^[3]	较低, 0.11 – 27.24 ^[3]	较低, 8/130 ^{RP} ^[39] , 3.3/90 ^R ^[40]	很低, 45/130 ^{RP} ^[39] , 28/90 ^R ^[40]	已芯片化, IEEE 802.15.4a 标准,适用于工业无线通信和无线传感器网
5	SC-DSSS-RAKE/TDE – BPSK/MBOK ^[2,14,20,41]	很近, 1 – 20 ^[2]	很高, 28 – 400 ^[2]	较高, 9.3/180 ^R ^[41] , 24/130 ^P ^[20]	较高, 280/180 ^R ^[41] , 181/130 ^P ^[20]	已芯片化, IEEE 802.15.3a 提案,适用于个人无线通信
6	SC-DSSS-FDE-BPSK ^[18,19]	很近, 1 – 20 ^[19]	很高, 28 – 400 ^[19]	较高	较高	仅为理论研究,适用于个人无线通信
7	SC-CSS-DQPSK/2BOK ^[23,24]	较近, 10 – 50	很低, 0.1 – 2 ^[23,24]	较低	较低	仅为理论研究,适用于工业无线通信
8	SC-FHSS-FDE-OOK/2FSK ^[8,42]	很近, 5 – 20 ^[42]	较低, 1 – 20 ^[42]	较低, 3/130 ^R ^[42]	较低, 20/130 ^R ^[42]	已芯片化,适用于工业无线通信
9	MC-DSSS/FHSS – OFDM-QPSK ^[4,17,43,44]	很近, 1 – 10 ^[4]	很高, 55 – 480 ^[4]	较高, 11/65 ^{RP} ^[43] , 15.58/180 ^R ^[44]	较高, 383/65 ^{RP} ^[43] , 285/180 ^R ^[44]	已芯片化, IEEE 802.15.3a 提案和 ECMA 368/369 标准,适用于个人无线通信
10	MC-THSS/FHSS-OFDM – BPSK/QPSK ^[7]	较近, 10 – 100 ^[7]	很低, 0.04 – 1 ^[7]	较高	较高	仅为理论研究,适用于方案 9 的拓展距离应用
11	MC-DSSS/FHSS-OFDM/FDE – 16QAM/64QAM ^[10,11,45]	极近, 0.1 – 1	极高, 480 – 2880 ^[45]	很高, 1.8/90 ^{RA} ^[45]	很高, 156/90 ^{RA} ^[45]	部分功能已芯片化,适用于无线体域网的高速应用
12	MC-THSS-OOK/MPAM ^[31,32]	极近, 0.2 – 2	很高, 110 – 800 ^[31]	较高	较高	仅为理论研究,适用于无线体域网的高速应用

右上角标注“R”表示该电路为 RF(Radio Frequency, 射频)收发信机部分;标注“P”表示该电路为 PHY(物理层)基带处理部分;标注“RP”表示该电路包括完整的 RF 与 PHY 部分;标注“A”表示芯片面积仅为有效面积。

表 3 不满足功率谱密度限制时典型超宽带通信系统实现方案的应用场景

序号	典型超宽带通信系统实现方案	通信距离 (m)	通信速率 (Mbit/s)	实现复杂度	功耗
1	CF-THSS-RAKE-OOK/2PPM/2PAM	较远, 100 – 1000	很低, 0.01 – 1	较高	较高
2	CF-CSS-RAKE/TDE-2BOK/2PPM	很远, 200 – 2000	很低, 0.01 – 1	较高	较高
3	SC-THSS/FHSS-RAKE/TDE-BPSK	较远, 100 – 1000	较低, 0.1 – 10	很高	很高
4	SC-THSS/CSS-RAKE/TDE-OOK/DBPSK/2PPM	很远, 500 – 5000	极低, 0.001 – 0.1	很高	很高
5	SC-THSS/DSSS-FDE-BPSK/QPSK	较远, 50 – 500	较高, 1 – 100	很高	很高
6	MC-DSSS/FHSS-OFDM/FDE-QPSK/16QAM/64QAM	较远, 20 – 200	很高, 10 – 1000	极高	极高

7 结论

目前超宽带技术的种类很多,系统实现方案也层出不穷,但目前的研究缺乏对各种技术与系统实现方案的公平合理的综合性能比较和应用场景分析.本文根据现有文献资料和仿真研究,详细分析了基带调制、抗多径处理、扩频和载波变频这四类超宽带通信技术的特征和应用场景.通过技术体制分析并参考现有文献提供的数据,以通信距离、通信速率、实现复杂度和功耗作为主要评价标准,给出了现有的 12 种满足功率谱密度限制的典型超宽带通信系统实现方案的应用场景.同时,总结了不满足功率谱密度限制的超宽带远距

离通信系统的研究现状与应用需求,通过技术体制分析提出了 6 种实现方案,并给出了其应用场景.本文的分析与结论对超宽带系统的优化设计和超宽带技术的多元化发展具有重要意义。

参考文献

- [1] ET-Docket No. 98 – 153, Revision of Part 15 of the Commission’s Rules Regarding Ultra-Wideband Transmission Systems [S]. Washington, DC: Federal Communications Commission, 2002.
- [2] R Fisher, R Kohno, M McLaughlin, et al. DS-UWB Physical Layer Submission to 802.15 Task Group 3a[R]. Washington,

- DC: IEEE Press, 2004.
- [3] IEEE Std 802.15.4a – 2007, Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs) [S]. Washington, DC: IEEE Press, 2007.
- [4] ECMA-368, High Rate Ultra Wideband PHY and MAC Standard (3rd Edition) [S]. Geneva: ECMA International, 2008.
- [5] 赵亮, 刘双平, 金梁, 等. 超宽带系统的功率谱密度限制问题研究 [J]. 电信科学, 2011, 27(2): 34 – 39.
Zhao L, Liu S P, Jin L, et al. Research on the power spectral density limit in UWB systems [J]. Telecommunications Science, 2011, 27(2): 34 – 39. (in Chinese)
- [6] Y F Chen, J Q Teo, J C Y Lai, et al. Cooperative communications in ultra-wideband wireless body area networks: channel modeling and system diversity analysis [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2009, 27(1): 5 – 16.
- [7] S Y Yeo, H K Song. Flexible and reliable transmission techniques for scale-free UWB system [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2008, 54(4): 1714 – 1721.
- [8] M Ghavami, L B Michael, R Kohno. Ultra Wideband Signals and Systems in Communication Engineering (Second Edition) [M]. New York: John Wiley & Sons, 2007.
- [9] 杨志华, 张钦宇, 王野. 非相干能量检测 UWB 接收机误码率性能优化 [J]. 电子学报, 2009, 37(5): 951 – 956.
Yang Z H, Zhang Q Y, Wang Y. Optimization of UWB non-coherent receiver [J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(5): 951 – 956. (in Chinese)
- [10] M Kamoun, L Mazet, M Courville, et al. A multicode approach for high data rate UWB system design [J]. IEEE Transactions on Communications, 2009, 57(2): 553 – 561.
- [11] C Razzell, J Yang, D Birru. Approaches and considerations for evolution of OFDM-based UWB PHY solutions beyond 1Gbps [A]. IEEE International Conference on Ultra-Wideband [C]. Washington, DC: IEEE Press, 2007. 405 – 410.
- [12] Foerster J. IEEE P802.15 – 02/490r1 – SG3a, Channel Modeling Sub-committee Report Final [R]. Washington, DC: IEEE Press, 2005.
- [13] 廖学文, 朱世华, 曾二林. 针对超宽带发射参考接收机中符号间干扰的 Turbo 均衡 [J]. 电子学报, 2008, 36(1): 146 – 151.
Liao X W, Zhu S H, Zeng E L. Turbo equalizer of ultra-wideband transmitted-reference receiver under inter-symbol interference [J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(1): 146 – 151. (in Chinese)
- [14] J McCorkle. Ultra wide bandwidth (UWB): gigabit wireless communications for battery operated consumer applications [A]. Symposium on VLSI Circuits [C]. Washington, DC: IEEE Press, 2005. 6 – 9.
- [15] 徐斌, 毕光国. UWB_OFDM 系统的实现结构 [J]. 电子学报, 2004, 32(12A): 157 – 160.
- Xu B, Bi G G. Implementation structures for UWB-OFDM systems [J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(12A): 157 – 160. (in Chinese)
- [16] 田玲, 朱红兵, 洪伟. 超宽带射频接收机的研制 [J]. 电子学报, 2007, 35(10): 1838 – 1842.
Tian L, Zhu H B, Hong W. Research on ultra-wideband RF receiver [J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(10): 1838 – 1842. (in Chinese)
- [17] 张士兵, 张力军, 徐晨. 基于多带 OFDM 的超宽带通信系统 [J]. 通信学报, 2006, 27(3): 79 – 85.
Zhang S B, Zhang L J, Xu C. Ultra-wideband system based on multi-band OFDM [J]. Journal on Communications, 2006, 27(3): 79 – 85. (in Chinese)
- [18] Y Wang, X D Dong. Frequency-domain channel estimation for SC-FDE in UWB communications [J]. IEEE Transactions on Communications, 2006, 54(12): 2155 – 2163.
- [19] H Sato, T Ohtsuki. Frequency domain channel estimation and equalization for direct sequence ultra wideband (DS-UWB) system [J]. IEEE Proceedings Communications, 2006, 153(1): 93 – 98.
- [20] A Koyama, H Iwami, Y Mizoguchi, et al. A DSSS UWB digital PHY/MAC transceiver for wireless ad hoc mesh networks with distributed control [A]. IEEE International Solid-State Circuits Conference [C]. Washington, DC: IEEE Press, 2006. 992 – 1001.
- [21] 赵亮, 金梁, 刘双平, 等. 四种超宽带扩频方案的电磁兼容性能研究 [J]. 电子与信息学报, 2011, 33(3): 527 – 532.
Zhao L, Jin L, Liu S P, et al. Research on the electromagnetic compatibility of four ultra-wideband spread spectrum schemes [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2011, 33(3): 527 – 532. (in Chinese)
- [22] A P Chandrakasan, F S Lee, D D Wentzloff, et al. Low-power impulse UWB architectures and circuits [J]. Proceedings of the IEEE, 2009, 97(2): 332 – 352.
- [23] P Zhang, H Liu. An ultra-wide band system with chirp spread spectrum transmission technique [A]. 6th International Conference on ITS Telecommunications Proceedings [C]. Washington, DC: IEEE Press, 2006. 294 – 297.
- [24] J Pinkley. Low Complexity Indoor Wireless Data Links Using Chirp Spread Spectrum [D]. Alberta, Canada: Department of Electrical and Computer Engineering, University of Calgary, 2003.
- [25] M Chomiki. SAW-based solutions for UWB communications [A]. European Radar Conference [C]. Washington, DC: IEEE Press, 2005. 263 – 266.
- [26] Y J Zheng, Y Tong, C W Ang. A CMOS carrier-less UWB transceiver for WPAN applications [A]. IEEE International Solid-State Circuits Conference [C]. Washington, DC: IEEE

- Press, 2006. 378 – 387.
- [27] B Qin, H Y Chen, X Wang, et al. An ultra low-power FCC-compliant 5th-derivative Gaussian pulse generator for IR-UWB transceiver[J]. Chinese Journal of Electronics, 2009, 18(4): 605 – 609.
- [28] M G Benedetto, B R Vojcic. Ultra wide band wireless communications: a tutorial[J]. Journal of Communication and Networks, 2003, 5(4): 290 – 302.
- [29] J Ryckaert, M Badaroglu, C Desset, et al. Carrier-based UWB impulse radio; simplicity, flexibility, and pulser implementation in 0.18-micron CMOS[A]. IEEE International Conference on Ultra-Wideband[C]. Washington, DC: IEEE Press, 2005. 432 – 437.
- [30] 汪一鸣, 朱洪波. 一种基于自适应的 DS-UWB 同步捕获方法[J]. 电子学报, 2007, 35(6): 1148 – 1152.
Wang Y M, Zhu H B. A synchronization scheme based on the adaptation algorithm for DS-UWB[J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(6): 1148 – 1152. (in Chinese)
- [31] M Mittelbach, R Moorfeld, A Finger. Performance of a multi-band impulse radio UWB architecture[A]. The 3rd ACM International Conference on Mobile Technology, Applications and Systems[C]. New York: ACM Press, 2006. 1 – 6.
- [32] H L Xu, L Q Yang. Differential UWB communications with digital multicarrier modulation[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2008, 56(1): 284 – 295.
- [33] T Zasowski, A Witneben. Performance of UWB receivers with partial CSI using a simple body area network channel model[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2009, 27(1): 17 – 26.
- [34] A F Molisch. Ultra-wide-band propagation channels[J]. Proceedings of the IEEE, 2009, 97(2): 353 – 371.
- [35] S S Ghassemzadeh, R Jana, C W Rice, et al. Measurement and modeling of an ultra-wide bandwidth indoor channel[J]. IEEE Transactions on Communications, 2004, 52(10): 1786 – 1796.
- [36] M Crepaldi, C Li, K Dronson, et al. An ultra-low-power interference-robust IR-UWB transceiver chipset using self-synchronizing OOK modulation[A]. IEEE International Solid-State Circuits Conference [C]. Washington, DC: IEEE Press, 2010. 226 – 227.
- [37] T Terada, R Fujiwara, G Ono, et al. Intermittent operation control scheme for reducing power consumption of UWB-IR receiver[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2009, 44(10): 2702 – 2710.
- [38] S Harma, V P Plessky, X Y Li, et al. Feasibility of ultra-wide-band SAW RFID tags meeting FCC rules[J]. IEEE Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 2009, 56(4): 812 – 820.
- [39] D Lachartre, B Denis, D Morche, et al. A 1.1nJ/b 802.15.4a-compliant fully integrated UWB transceiver in 0.13 μ m CMOS[A]. IEEE International Solid-State Circuits Conference [C]. Washington, DC: IEEE Press, 2009. 312 – 313, 313a.
- [40] M Cavallaro, G Sapone, G Giarrizzo, et al. A 3 – 5-GHz UWB front-end for low-data rate WPANs in 90-nm CMOS [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2010, 58(4): 854 – 865.
- [41] S Iida, K Tanaka, H Suzuki, et al. A 3.1 to 5 GHz CMOS DSSS UWB transceiver for WPANs[A]. IEEE International Solid-State Circuits Conference [C]. Washington, DC: IEEE Press, 2005. 214 – 215.
- [42] E Novakov, J M Fournier. An ultra-wideband impulse-radio communication method and transceiver [A]. IEEE Global Telecommunications Conference [C]. Washington, DC: IEEE Press, 2009. 1 – 5.
- [43] D Leenaerts, R V D Beek, J Bergervoet, et al. A 65 nm CMOS inductorless triple band group WiMedia UWB PHY [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2009, 44(12): 3499 – 3510.
- [44] H Zheng, S Z Lou, D T Lu, et al. A 3.1 GHz/8.0 GHz single-chip transceiver for MB-OFDM UWB in 0.18 – μ m CMOS process [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2009, 44(2): 414 – 426.
- [45] A Tanaka, K Numata, H Kodama, et al. A 2.88Gb/s digital hopping UWB transceiver[A]. IEEE International Solid-State Circuits Conference [C]. Washington, DC: IEEE Press, 2009. 318 – 319, 319a.

作者简介

赵 亮 男, 1982 年生于河北深县, 国家数字交换系统工程技术研究中心博士生, 主要研究方向为超宽带无线通信与移动通信网络。

E-mail: zhaoliangm@gmail.com

金 梁 男, 1969 年生于北京, 国家数字交换系统工程技术研究中心教授、博士生导师, 主要研究方向为超宽带无线通信、通信信号处理与第三代移动通信。 E-mail: liangjin@263.net

刘双平 男, 1975 年生于湖北荆州, 国家数字交换系统工程技术研究中心讲师、博士, 主要研究方向为超宽带无线通信与通信信号处理。 E-mail: liu_shuang_ping@163.com

季中恒 男, 1971 年生于江苏丹阳, 国家数字交换系统工程技术研究中心副教授, 主要研究方向为超宽带系统的硬件设计。

E-mail: jzh719@163.com

禹春来 男, 1970 年 2 月生于河南荥阳, 国家数字交换系统工程技术研究中心博士后, 主要研究方向为超宽带无线通信网络。

E-mail: y_chunlai@163.com