

无线体域网低复杂度重复码解扩频方法研究

迟宇, 陈岚, 吕超

(中国科学院 微电子研究所, 北京 100029)

摘要: 为了提高数据传输的可靠性, 降低窄带接收机的复杂度, 无线体域网标准 IEEE 802.15.6 采用了基于重复码的扩频方法。通过设计一种根据动态阈值选择性进行量度运算的解扩频结构, 并结合硬判决阈值特性利用简化的最大比合并以及广义最小距离原理, 提出了硬阈值一合并法和硬阈值一删除法, 计算复杂度较小, 同时解扩频性能近似最优。理论分析及仿真结果表明, 与基于最大似然方法的解扩频相比, 其扩频增益接近理论值, 在高信噪比环境下, 计算复杂度可降低 86%以上。

关键词: 解扩频; 重复码; 软判决; 低复杂度; 无线体域网

中图分类号: TN911

文献标识码: A

Low-complexity despreading scheme with repetition code for wireless body area networks

CHI Yu, CHEN Lan, LV Chao

(Institute of Microelectronics of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: To improve the reliability of data transmission and reduce the complexity of the narrow band receiver for wireless body area networks (WBAN), spreading with repetition code is used in IEEE 802.15.6 standard. A despreading structure in which the metrics of reliability were calculated selectively according to the dynamic threshold was designed. Combined with hard decision, hard threshold-combine and hard threshold-delete despreading methods by simplifying maximal ratio combining and generalized minimum distance principle respectively were proposed, which had low complexity and near-optimal performance. The theoretical analysis and simulation results show that compared to despreading based on maximum likelihood method, the spreading gain of the proposed methods is close to the theoretical value and the computational complexity can be reduced by 86% at most under high SNR circumstances.

Key words: despreading; repetition code; soft-decision; low-complexity; wireless body area networks

1 引言

无线体域网 (WBAN, wireless body area networks) 以无线通信的方式将布设在体表以及植入人体的体征检测/监测传感器信息进行收集^[1], 对人体体征信息进行长期的、移动的、便携的监测, 为移动医疗提供重要的无线通信解决方案^[2]。WBAN 的传输特性包括低功耗、高可靠性和低网络延迟^[3]。为满足穿戴式和植入式设备在短距离无线通信方面低功耗、低成本、安全和高可靠的传输要求^[4], 国际电子电气工程协会 (IEEE) 于 2012 年发布了

标准 IEEE 802.15.6^[5], 规范无线体域网物理层和 MAC 层。在 IEEE 802.15.6 标准的实现方面, 国内外学者在物理层^[6~15]、MAC 层^[16,17]和网络层^[18]做了大量工作, 建立了人体信道模型^[19,20], 提出同频带网络共存的解决方案以及高能效设计方法等^[4]。为抵抗噪声较大的场景 (如人体的移动、突发电磁干扰等), 满足突发预警等重要信息的传输需求, 高 QoS 保障变得非常关键, 例如心电数据传输的误码率需求小于 10^{-10} ^[4,21]。因此高可靠性传输给无线体域网通信提出较高的要求。

扩频作为无线通信抗干扰能力的一项重要技

收稿日期: 2014-06-27; 修回日期: 2015-04-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61303253)

Foundation Item: National Natural Science Foundation of China (61303253)

术，在不同的系统中被广泛采用。如 UWB 系统^[22]、水声通信系统^[23]、CDMA 系统^[24]以及 OFDM 系统^[25]都有国内外学者对扩频通信技术的相关研究。常见扩频方式包括直接序列扩频 (DSSS)，并行组合扩频 (PCSS)^[26]和跳频扩频等。近年来，一些新的扩频技术如循环移位扩频、M 元扩频、正交 M 元扩频、多载波扩频和 M 元码元移位键控扩频^[23]等，都在一定程度上保证抗噪声能力的同时提高了通信速率。WBAN 为资源受限的单载波通信系统，并行组合扩频需要的硬件资源开销较大，运算量较多，不适合应用在 WBAN 窄带物理层中。为保证较低比特速率下重要信息如前导和帧头等数据的正确性，标准采用了超帧级别的跳频方案，每个超帧根据预定义的模式改变载波频率以降低冲突概率，同时采用重复码扩频、交织和加扰 3 个分立模块级联实现 DSSS。在标准中，扩频之前采用 BCH 信道编码提高数据纠错能力，因此为减少额外的编译码电路，降低实现的复杂度，扩频方案没有采用线性分组码或者卷积码编码器来提高编码增益，而仅仅采用处理增益无编码增益的重复码扩频方式。另外，在 $\frac{\pi}{2}$ -DBPSK 调制方式下重复码扩频也使解调判决变得简单。

在 WBAN 数字基带收发信机的设计中，BACHMANN^[13]和 LIANG^[15]设计中的解扰、解交织和解扩频过程均在解调硬判决变为比特信息之后，此方式的缺点是会丢失大部分重要的解调信息，扩频的作用不明显，可靠性较差。CHEN 等^[11]在 WBAN 系统仿真中采用的是基于软判决解扩频的方式，由于在发射机端重复码扩频和交织、加扰信号处理模块为分立级联结构，因此在接收机端，若采用常规的软判决解扩频方式，不仅要量化软判决量度，使量度参与解扰运算和解交织运算，同时还要进行相关的解扩频运算，这种方式使整个解扩频流程的运算量大大增加，增加了大量功耗。

针对硬判决解扩频可靠性差、软判决解扩频运算量大的问题，本文设计了一种解扩频结构，并提出了 2 种软判决解扩频方法，通过设置硬判决阈值和基于可靠性量度的软判决译码的结合，设计了硬阈值—合并法和硬阈值—删除法的重复码解扩频

方案，前者结合了硬判决动态阈值和基于简化最大比合并的最大似然译码方法，后者结合了硬判决动态阈值和修正广义最小距离 (GMD) 译码的方法，使得其处理增益接近理论扩频增益，通过减少量度的运算量而使计算复杂度大大降低，适合应用在资源受限的无线体域网中。

2 重复码软判决解扩频模型

IEEE 802.15.6^[5]标准中，发射机窄带物理层扩频、交织、加扰等信号处理流程如图 1 所示。

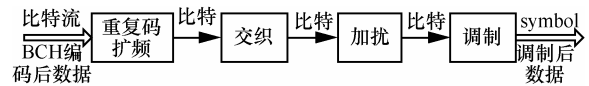


图 1 IEEE 802.15.6 标准中扩频、交织、加扰信号处理流程

WBAN 数字接收机中，通常的基带信号处理流程为图 1 所示的逆过程，BACHMANN^[13]和 LIANG^[15]采用的硬判决解扩频方式如图 2 所示。

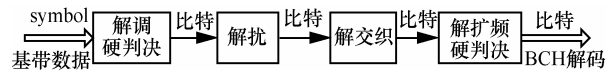


图 2 WBAN 数字接收机硬判决解扩频流程

图 2 所示的硬判决解扩频方法会丢失大部分有用信息，扩频处理增益很小，采用软判决的方式有利于发挥扩频的作用，增加系统的可靠性，提升抗干扰能力。常规的软判决解扩频流程如图 3 所示。

LIN^[27]在书中指出，以 BPSK 硬判决译码为例，每个接收符号 r_i 的绝对值 $|r_i|$ 可用做其硬判决译码比特 z_i 的可靠性量度，因为与此硬判决关联的对数似然比的绝对值 $\left| \log \left(\frac{P(r_i | v_i = 1)}{P(r_i | v_i = 0)} \right) \right|$ 与 $|r_i|$ 成正比，其中， v_i 为第 i 个传输比特， $|r_i|$ 越大， z_i 的硬判决可靠性越高。图 3 所示的软判决解扩频方式由于引入了可靠性量度，导致量度参与解扰运算、解交织映射和解扩频运算，使运算量大大增加，因此本文提出一种软判决解扩频结构，如图 4 所示。其中， F 为扩频因子，可靠性量度可简化为解调（或差分解调）信息幅度 d_i ，根据标准，交织过程利用 $2F$ 个符号进行位置映射，故在该流程中需存储 $2F$ 个可靠性量度值和 $2F$ 个解扰多项式同步序列。当满足

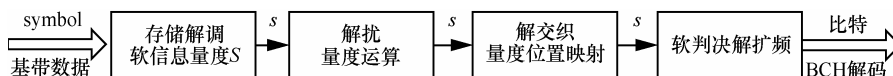


图 3 WBAN 数字接收机基带常规软判决解扩频流程

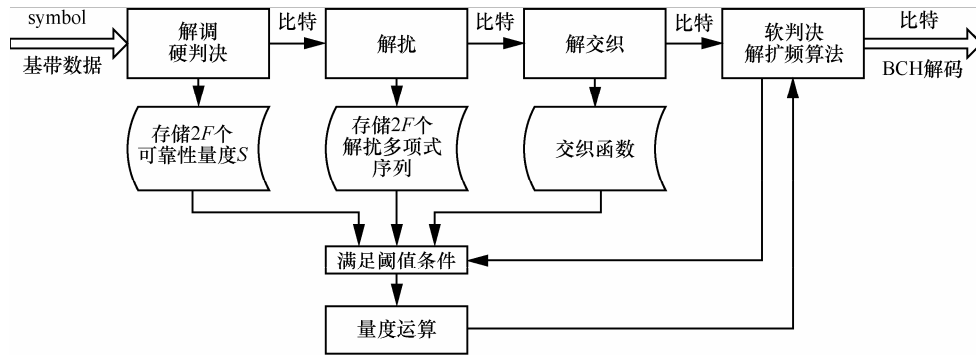


图 4 本文提出的软判决解扩频流程

一定的阈值条件时进行量度运算，并采用软判决解扩频的方法，否则采用硬判决方式进行解扩频。基于图 4 的解扩频结构，下一节将提出硬阈值—合并法以及硬阈值—删除法 2 种软判决解扩频方法，充分利用此结构大幅度减少整个流程的运算量。

3 硬阈值—合并/删除法原理与分析

3.1 硬阈值—合并法

设重复码扩频因子为 F ，算法描述如下。

1) 根据接收序列 r ，得到硬判决接收序列 z ，对 z 中每个符号分配一个可靠性值，可靠性值可简化为解调（或差分解调）信息幅度 r_i 。

2) 设 z 中 0 和 1 的个数分别为 n_0 和 n_1 。当 $|n_0 - n_1| \leq m$ ， m 为整数，则计算合并值 h 如下

$$h = \sum_{i=1}^F r_i \quad (1)$$

进行步骤 3)；当 $|n_0 - n_1| > m$ ， m 为整数，则根据大数逻辑对 z 进行解扩频，结束。

3) 根据 h 的极性进行扩频符号判决，如下

$$v = \begin{cases} 0, & h \geq 0 \\ 1, & h < 0 \end{cases} \quad (2)$$

得到解扩频符号判决结果 v ，结束。

当 $m \geq F$ ，硬阈值—合并法等效为最大似然解扩频方法；当 $m < 0$ ，该方法等效为硬判决解扩频方法。以下对该方法的运算量进行分析。

考察一帧数据解调后（未判决）得到 N 个符号，每个符号进行 k bit 量化，进行 1 bit 比较运算、1 bit 取反运算和 1 bit 异或运算的复杂度均为 $O(1)$ ， k bit 全加器平均运算复杂度为 $O(k) = (2k - 1)O(1)$ 。

① 当 $m < 0$ 时，解扩频流程如图 2 所示。各部分模块产生的运算量如表 1 所示。

② 当 $m \geq F$ 时，解扩频流程如图 3 所示。各

部分模块产生的运算量如表 2 所示。

表 1 图 2 中各部分模块产生的运算量

模块	运算量	单位	运算类型
解调硬判决	N	$O(1)$	比较
解扰	N	$O(1)$	异或
解交织及硬判决解扩频	$\frac{N(F-1)}{F}$	$O(1)$	比较
总计	$3N - \frac{N}{F}$	$O(1)$	

表 2 图 3 中各部分模块产生的运算量

模块	运算量	单位	运算类型
解扰	$N + \frac{2kN}{2}$	$O(1)$	比较+取相反数运算
解交织及量度合并	$\frac{N(F-1)}{F}$	$O(k)$	k bit 加法
解扩频硬判决	$\frac{N}{F}$	$O(1)$	比较
总计	$3kN + \frac{2N(1-k)}{F}$	$O(1)$	

③ 当 $0 \leq m < F$ 时，解扩频流程如图 4 所示。设当前信道环境下，满足阈值条件的次数为 T ，各部分模块产生的运算量如表 3 所示。

表 3 图 4 中硬阈值—合并法各部分模块产生的运算量

模块	运算量	单位	运算类型
硬判决分支解调	N	$O(1)$	比较
硬判决分支解扰	N	$O(1)$	异或
硬判决分支解扩频	N	$O(1)$	比较
软判决分支解扰	$FT + \frac{2kFT}{2}$	$O(1)$	比较+取相反数运算
软判决分支量度合并	$T(F-1)$	$O(k)$	k bit 加法
软判决分支解扩频	T	$O(1)$	比较
总计	$3N + 3kFT + 2T(1-k)$	$O(1)$	

综上，硬阈值—合并法与最大似然解扩频方法

表 4 图 4 中硬阈值—删除法各部分模块产生的运算量

模块	运算量	单位	运算类型
硬判决分支解调	N	$O(1)$	比较
硬判决分支解扰	N	$O(1)$	异或
硬判决分支解扩频	N	$O(1)$	比较
软判决分支解扰	$\frac{FT + 2kFT}{2}$	$O(1)$	比较+取相反数运算
删除 x 个符号	$\frac{FT}{4k} + \frac{k}{2 \sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^x (F-i)}$	$O(1)$	取绝对值+比较
软判决分支解扩频	$\sum_{i=1}^T (F-x)$	$O(1)$	比较
总计	$3N + (2k+1)FT + \frac{k}{2 \sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^x (F-i) + \sum_{i=1}^T (F-x)}$	$O(1)$	

相比，减少的运算量可表示为

$$\alpha = \frac{[3kN + \frac{2N(1-k)}{F}] - [3N + 3kFT + 2T(1-k)]}{3kN + \frac{2N(1-k)}{F}} \quad (3)$$

在信噪比较高的情况下，误码率较小， $\frac{T}{N} \rightarrow 0$ ，

若 $F \geq 8, k \geq 8$ ，则可降低 86% 以上运算量。

3.2 硬阈值—删除法

设重复码扩频因子为 F ，算法描述如下。

1) 根据接收序列 r ，得到硬判决接收序列 z ，对 z 中每个符号分配一个可靠性值，可靠性值可简化为解调（或差分解调）信息幅度 r 。

2) 设 z 中 0 和 1 的个数分别为 n_0 和 n_1 ，当 $|n_0 - n_1| \leq m$ ， m 为整数，则删除最不可靠的 x 个符号，其中， $x = |n_0 - n_1| + 1$ ，进行步骤 3)；当 $|n_0 - n_1| > m$ ， m 为整数，则根据大数逻辑对 z 进行解扩频，结束。

3) 由其余 $F-x$ 个符号，得到硬判决序列 z_{delete} ，根据大数逻辑对 z_{delete} 进行解扩频，结束。

当 $m < 0$ ，该方法等效为硬判决解扩频方法，以下对该方法的运算量进行分析。

考察一帧数据解调后（未判决）得到 N 个符号，每个符号进行 k bit 量化，进行 1bit 比较运算、1bit 取反运算和 1bit 异或运算的复杂度均为 $O(1)$ ， k bit 全加器平均运算复杂度为 $O(k) = (2k-1)O(1)$ 。

1) 当 $m < 0$ 时，解扩频流程如图 2 所示。同表 1 的分析，整个解扩频流程的运算量为 $(3N - \frac{N}{F})O(1)$ 。

2) 当 $m \geq 0$ 时，解扩频流程如图 4 所示。设当前信道环境下，满足阈值条件的次数为 T ，各部分模块产生的运算量如表 4 所示。

综上，硬阈值—删除法与最大似然解扩频方法相比，减少的运算量可表示为

$$\alpha = \frac{[3kN + \frac{2N(1-k)}{F}] - [3N + (2k+1)FT + \frac{k \sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^x (F-i)}{2} + \sum_{i=1}^T (F-x)]}{3kN + \frac{2N(1-k)}{F}} \quad (4)$$

在信噪比较高的情况下，误码率较小， $\frac{T}{N} \rightarrow 0$ ，

若 $F \geq 8, k \geq 8$ ，则可降低 86% 以上运算量。

4 算法仿真与分析

4.1 仿真条件

由第 3 节分析可知，硬阈值—合并法和硬阈

值—删除法的性能主要受扩频因子 F 、量化位宽 k 、阈值 m 的大小以及信噪比（决定 T 的取值）的影响。本文将分别评估上述参数对解扩频性能的影响。参照 IEEE 802.15.6 标准，仿真参数如表 5 所示。其中，交织块大小为 $2F$ bit， $a(i)$ 、 $b(i)$ 分别表示交织器的输入、输出序列， rem 为取模运算，设 F 为偶数。

表 5 仿真参数设置

各模块	仿真参数
调制方式	$\frac{\pi}{2}$ -DBPSK
解调方式	差分解调
负载长度	255 byte
信道环境	高斯白噪声
交织函数	$b(i) = a[F \cdot \text{rem}(i, 2) + \lfloor \frac{i}{2} \rfloor]$ $i = 0, 1, \dots, 2F - 1$
加扰多项式	$G(x) = 1 + x^2 + x^{12} + x^{13} + x^{14}$

4.2 量化位宽对软判决解扩频的影响

不同的量化位宽影响着可靠性量度的精度，从而影响解扩频的判决。

当 $F=4$ 时，量化位宽 k 对软判决解扩频误码率的影响如图 5 所示。

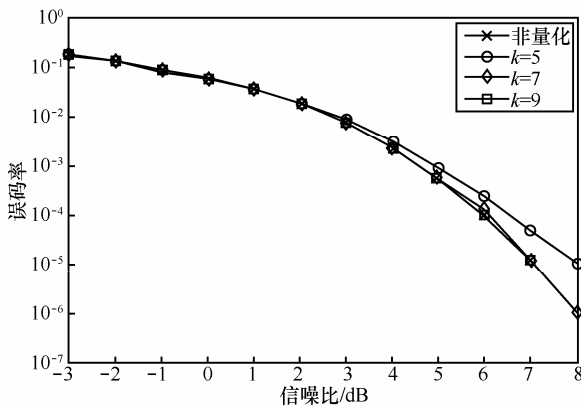


图 5 $F=4$ 时，量化位宽对软判决解扩的影响

当 $F=8$ 时，量化位宽对软判决解扩频误码率的影响如图 6 所示。

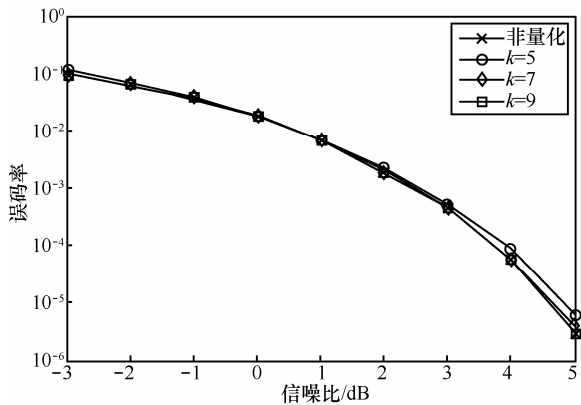


图 6 $F=8$ 时，量化位宽对软判决解扩的影响

由图 5 和图 6 可知，量化的位宽越大，量度进行运算的精度越高，误码率性能越接近非量化的理论性能，同时，扩频因子越大，量化位宽的影响越

小。在 WBAN 系统中，量化位宽取 7~9 bit 较为合适，信噪比损失小于 0.1 dB。

4.3 阈值 m 对算法性能的影响

不同的阈值 m 影响着软判决分支的次数 T ，从而影响解扩频的误码性能和运算复杂度。

设量化位宽 $k=8$ 和 $F=8$ ，不同 m 取值对本文提出的硬阈值—合并法解扩频误码性能的影响如图 7 所示。

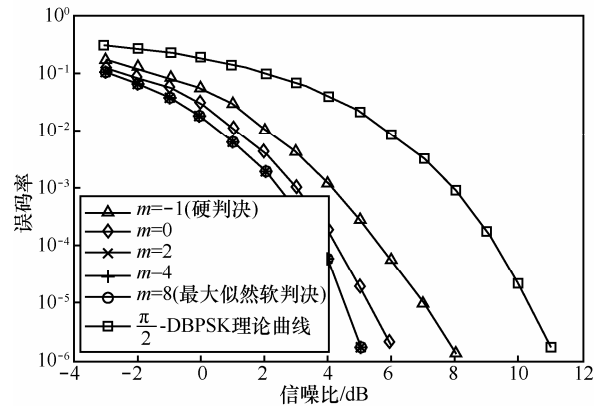


图 7 $k=8, F=8$ 时， m 对硬阈值—合并法解扩频误码性能的影响

由图 7 可知，该实验条件下，采用硬判决解扩频方式使 $\frac{\pi}{2}$ -DBPSK 调制的信噪比增益提升了约 4 dB，最大似然软判决解扩频的信噪比增益提升了约 5.8 dB。 m 值越大，硬阈值—合并法的误码率越小，误码性能越接近最大似然解扩频方法。当 $m=2$ 时，硬阈值—合并法较最大似然解扩频方法信噪比损失小于 0.1 dB。

$$\text{当 } \frac{E_b}{N_0} = 0 \text{ dB}, m=2, \frac{\pi}{2}\text{-DBPSK 差分解调误}$$

码率理论值为 $p=0.2$ ，故在 N 个符号内进入软判决分支的次数 T 可表示为

$$T = \left[C_F^2 p^2 (1-p)^2 + C_F^2 p^2 (1-p)^2 + C_F^2 p^2 (1-p)^2 \right] \frac{N}{F} \approx 0.025 2N \quad (5)$$

将式(5)的结果代入式(3)可得，硬阈值—合并法的运算复杂度较最大似然解扩频方法减小了 66.36%。

$$\text{当 } \frac{E_b}{N_0} = 8 \text{ dB}, m=2, \frac{\pi}{2}\text{-DBPSK 理论误码率}$$

为 $p=0.001$ ，由式(5)可得， $\frac{T}{N} \approx 0$ ，硬阈值—合并

法的运算复杂度较最大似然解扩频方法减小了 86%。信噪比越高，其运算复杂度降低得越多，越逼近极限值。

当 $k=8, F=8$ ，不同 m 取值对本文提出的硬阈值—删除法解扩频误码性能的影响如图 8 所示。

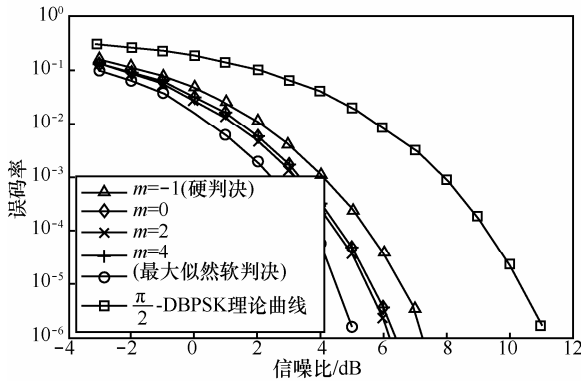


图 8 $k=8, F=8$ 时, m 对硬阈值—删除法解扩频误码性能的影响

由图 8 可知，该实验条件下， $m=2$ 时硬阈值—删除法的误码性能最好，信噪比较最大似然解扩频方法损失小于 0.8 dB。

当 $\frac{E_b}{N_0} = 0 \text{ dB}$ ， $m=2$ ， $\frac{\pi}{2}$ -DBPSK 差分调制

码率理论值为 $p=0.2$ ，进入软判决分支的次数 T 可表示为

$$T = \begin{cases} \frac{F}{C_F^2} p^{\frac{F}{2}} (1-p)^{\frac{F}{2}} \frac{N}{F}, & x=1 \\ \left[\frac{F-m}{C_F^2} p^{\frac{F-m}{2}} (1-p)^{\frac{F+m}{2}} + \frac{F+m}{C_F^2} p^{\frac{F+m}{2}} (1-p)^{\frac{F-m}{2}} \right] \frac{N}{F}, & x=3 \end{cases} \quad (6)$$

将式(6)的结果代入式(4)可得，硬阈值—删除法的运算复杂度较最大似然解扩频方法减小了 69.56%。

当 $\frac{E_b}{N_0} = 8 \text{ dB}$ ， $m=2$ ， $\frac{\pi}{2}$ -DBPSK 理论误码率为

$p=0.001$ ，由式(5)可得， $\frac{T}{N} \approx 0$ ，硬阈值—删除法的

运算复杂度较最大似然解扩频方法减小了 86%。信噪比越高，其运算复杂度降低的越多，越逼近极限值。

综上，相同阈值 m 的条件下，硬阈值—合并法的误码性能略好于硬阈值—删除法，但前者运算量也略大于后者。根据不同的需求和信噪比高低可以选择不同的方法，调节 m 的值，以权衡可靠性和运算复杂度。

4.4 解扩频方法对 WBAN 系统的影响

当 $F=2, m=0$ 时，硬阈值—合并法和硬阈值—删除法等效，采用标准规定的 BCH(63,51)编解码以及本文的解扩频方法后，对 WBAN 窄带通信系统的误分组性能进行了仿真，并与 CHEN^[11]的仿真结果进行对比，如图 9 所示。

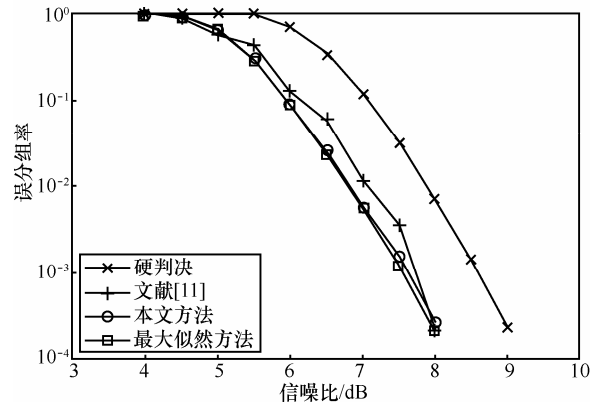


图 9 $k=7, F=2, m=0$ 时, WBAN 系统误分组率对比

图 9 表明，本文提出的方法误分组性能略好于 CHEN^[11]的结果，由式(3)得，在高信噪比条件下，本文方法的运算量较最大似然方法降低了约 80%。设计的结构和方法克服了硬判决解扩频方式误码性能损失，同时大幅度降低了常规软判决解扩频的运算量，适合应用于资源受限的无线体域网环境中。

5 结束语

低复杂度高可靠性解扩频方法对体域网通信芯片设计具有重要意义。基于硬判决的常规解扩频方法容易丢失大量有用信息，扩频增益很小；基于最大似然软判决解扩频方法运算量较大，导致功耗大大增加。针对上述问题，本文通过设计一种根据动态阈值选择性进行量度运算的解扩频结构，并结合硬判决阈值特性利用简化的最大比合并以及广义最小距离原理，提出了硬阈值—合并法和硬阈值—删除法 2 种软判决解扩频方法。通过调整硬判决阈值的方法减少量度的运算量，使其处理增益接近理论扩频增益，而计算复杂度大大降低。理论分析及仿真结果表明，与基于最大似然方法的软判决解扩频相比，硬阈值—合并法信噪比损失可小于 0.1 dB，硬阈值—删除法信噪比损失可小于 0.8 dB。在高信噪比环境下，2 种方法的运算量可降低 86% 以上。在资源受限的无线体域网场景中，提出的方案具有较重要的应用价值。

参考文献:

- [1] BALOUCHESTANI M, RAAHEMIFAR K, KRISHNAN S. Low power wireless body area networks with compressed sensing theory[A]. Proceedings of the IEEE 55th International Midwest Symposium on Circuits and Systems[C]. Boise, 2012. 916-919.
- [2] CHIN C A, CROSBY G V, GHOSH T. Advances and challenges of wireless body area networks for healthcare applications[A]. Proceedings of the 2012 International Conference on Computing Networking and Communications[C]. Maui, 2012. 99-103.
- [3] ZHANG A, HANLEN L W, HUANG X J. Spreading with walsh code for $\pi/2$ -DBPSK modulated WBAN systems[A]. IEEE 21st International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications Workshops[C]. Istanbul, 2010. 84-88.
- [4] CAVALLARI R, MARTELLI F, ROSINI R. A survey on wireless body area networks: technologies and design challenges[J]. IEEE Communication Survey and Tutorials, 2014, 16(3): 1635-1657.
- [5] IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks-Part 15.6: Wireless Body Area Networks [S]. 10.1109/IEEESTD.2012.6161600.
- [6] WONG A C W, DAWKINS M, DEVITA G. A 1 V 5 mA multimode IEEE 802.15.6/Bluetooth low-energy WBAN transceiver for biotelemetry applications[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2013, 48(1): 186-198.
- [7] SAVCI H S, ARVAS S, DOGAN N S. Low power analog baseband circuits in 0.18 μm CMOS for MICS and body area network receivers[A]. FL: Proceedings of IEEE Southeastcon[C]. Jacksonville, China, 2013. 1-5.
- [8] 骆丽, 吴凤姣. 应用于无线体域网 2.4 GHz 超低功耗唤醒接收机的设计[J]. 北京交通大学学报, 2013, 37(2): 57-62.
- LUO L, WU F J. A 2.4 GHz ultra low-power wake-up receiver in wireless body area networks[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2013, 37(2): 57-62.
- [9] YOO H J, BAE J. Low energy wireless body area network systems[A]. IEEE International Wireless Symposium[C]. Beijing, China, 2013. 1-2.
- [10] 陆希玉, 肖振宇, 金德鹏. 基于单载波超宽带的高速异构无线体域网[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2013, 53(3): 410-415.
- CHEN X Y, XIAO Z Y, JIN D P. Single carrier ultra-wide band based high speed heterogeneous wireless body area network[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2013, 53(3): 410-415.
- [11] CHEN M Y, HAN J, FANG D B. An ultra low-power and area-efficient baseband processor for WBAN transmitter[A]. Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference[C]. Kaohsiung, 2013. 1-4.
- [12] LIU W Y, WANG H Y, WU N J. A low power digital baseband transceiver for WBANs[A]. Proceedings of the IEEE 11th International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology[C]. 2012. 1-3.
- [13] BACHMANN C, SCHAIK G J V, BUSZE B. A 0.74 V 200 μW multi-standard transceiver digital baseband in 40nm LP-CMOS for 2.4 GHz Bluetooth Smart/ZigBee/IEEE 802.15.6 personal area networks[A]. IEEE International Solid-State Circuits Conference Digest of Technical Papers[C]. San Francisco, 2014. 186-187.
- [14] LIU Y H, HUANG X C, VIDOJKOVIC M. A 1.9nJ/b 2.4GHz multistandard (Bluetooth low energy/Zigbee/IEEE802.15.6) transceiver for personal/body-area networks[A]. IEEE International Solid-State Circuits Conference Digest of Technical Papers[C]. San Francisco, 2013. 446-447.
- [15] LIANG Y P, ZHOU Y, LI Y. The design and implementation of IEEE 802.15.6 baseband on FPGA[A]. IET International Conference on Communication Technology and Application[C]. Beijing, China, 2011. 872-876.
- [16] CARRANO R, PASSOS D, MAGALHAES L. Survey and taxonomy of duty cycling mechanisms in wireless sensor networks[J]. IEEE Communication Surveys and Tutorials, 2013, 16(1): 181-194.
- [17] 李浩然. 面向节能的无线体域网 MAC 层算法设计及实现[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
- LI H R. Design and Implementation of Energy-Saving Oriented MAC Layer Algorithm[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2013.
- [18] ELHADJ H B, CHAARI L, KAMOUN L. A survey of routing protocols in wireless body area networks for healthcare applications[J]. International Journal of E-Health and Medical Communications (JEHMC), 2012, 3(2): 1-18.
- [19] KUMPUNIEMI T, TUOVINEN T, HÄMÄLÄINEN M. Measurement based on body path loss modelling for UWB WBAN communications[A]. The 7th International Symposium on Medical Information and Communication Technology (ISMICT)[C]. Tokyo, 2013. 233-237.
- [20] SMITH D B, MINIUTTI D, LAMAHEWA T A. Propagation models for body-area networks: a survey and new outlook[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2013, 55(5): 97-117.
- [21] BAE J, SONG K, LEE H. A low-energy crystal-less double-fsk sensor node transceiver for wireless body-area network[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2012, 47(11): 2678-2692.
- [22] 徐晨, 张士兵. UWB 系统抗干扰扩频编码的研究[J]. 通信学报, 2005, 26(11): 24-29.
- XU C, ZHANG S B. Spreading and coding for anti-interference in UWB system[J]. Journal on Communications, 2005, 26(11): 24-29.
- [23] 于洋, 周锋, 乔钢. 正交 M 元码元移位键控扩频水声通信[J]. 声学学报, 2014, 39(1): 42-48.
- YU Y, ZHOU F, QIAO G. Orthogonal M-ary code shift keying spread spectrum underwater acoustic communication[J]. Acta Acustica, 2014, 39(1): 42-48.
- [24] KAMLE U, SANKAR J K. Performance evaluation of new multi level spreading codes for DS CDMA communication over Rayleigh fading channel[A]. International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics[C]. Mysore, 2013. 649-654.
- [25] MOUSSA S, DAHMANE A O, D'AMOURS C. MIMO-OFDM scheme based on permutation spreading[A]. The 14th International Conference on Advanced Communications Technology[C]. Pyeongchang, 2012. 679-682.
- [26] LIU M D, LI H L, GUO L L. Research of soft decision modulations based on parallel combinatory spread spectrum system[A]. Proceedings of the 5th Global Symposium on Millimeter Waves[C]. Harbin, 2012. 507-511.
- [27] LIN S, COSTELLO D J. Error Control Coding (Second Edition) [M]. New Jersey: Prentice Hall, 2004.

作者简介:



迟宇 (1988-), 男, 吉林长春人, 中国科学院微电子研究所博士生, 主要研究方向为无线体域网基带通信信号处理及芯片设计。



陈岚 (1968-), 女, 江苏无锡人, 中国科学院微电子研究所研究员、博士生导师, 主要研究方向为纳米及 SoC 芯片设计方法学和移动通信系统低功耗技术及物联网芯片技术等。

吕超 (1980-), 男, 山东临清人, 中国科学院微电子研究所副研究员, 主要研究方向为低功耗无线通信技术、体域网 SoC 设计等。