

文章编号: 2095-4980(2013)05-0724-06

面向窄带通信信号时差估计的数据压缩方法

汪子嘉, 于宏毅, 胡贇鹏

(解放军信息工程大学 信息工程学院, 河南 郑州 450002)

摘 要: 近年来面向时差估计的数据压缩成为信号处理领域的研究热点之一。类似基于传感器网络时差定位的应用场景, 要求运用实用化的数据压缩技术, 以降低平台设计和实现的难度, 同时在数据传输量和时差估计精确度之间取得较好折衷。利用窄带通信信号在被子带抽取压缩后, 时差估计克拉美罗界最低的子带基本对应信噪比最高的子带这一特点, 将复杂的基于费舍尔信息量最大化的压缩准则合理地简化为基于离散傅里叶变换幅值平方和最大化准则, 以提高压缩效率, 同时为降低有限观测时间的影响, 提出一种频点抽取结合子带抽取的压缩方法。最后经仿真验证, 在压缩比不变的前提下, 提出的改进数据压缩方法相比单纯的子带抽取法明显提高了时差估计精确度, 在信噪比大于 0 dB 的情况下, 通过仅传输和利用 128 个频点信息, 可以实现几十纳秒量级的时差估计精确度。

关键词: 窄带通信信号; 时差估计; 数据压缩; 离散傅里叶变换; 频点抽取

中图分类号: TN911.72

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201305.0724

Data compression for Time Difference of Arrival estimation of narrow-band communication signal

WANG Zi-jia, YU Hong-yi, HU Yun-peng

(School of Information System Engineering, Information Engineering University of PLA, Zhengzhou Henan 450002, China)

Abstract: In recent years, data compression for Time Difference of Arrival(TDOA) estimation has become the hotspot in the signal processing field. Application field like emitter location using TDOA based on sensors network requires practical data compression technology, which can reduce the difficulty of platform design and implementation, and get a trade-off between the data amount for transmission and the accuracy of TDOA estimation. The compression rule based on maximizing Fisher Information is simplified to which based on maximizing the sum of the squared discrete Fourier transform magnitude, and the efficiency of data compression is improved, according to the feature that sub-band with lowest TDOA estimation Cramer-Rao Bound has the highest signal to noise ratio generally after the narrow-band communication signal being compressed by sub-band extraction. The sub-band extraction method is developed by combining with frequency extraction in order to reduce the effect of limited observing time. Simulation results show that, the proposed measures can obtain much higher accuracy of TDOA estimation than sun-band extraction method under the same compression ratio; tens nanosecond order of TDOA estimation accuracy can be achieved by transmitting and utilizing only 128 frequency points under signal to noise ratio above 0 dB.

Key words: narrow-band communication signal; TDOA estimation; data compression; Discrete Fourier Transform; frequency extraction

时差估计在社会和军事等众多领域有着广泛应用, 因此一直是信号处理领域的重要问题。如何提高时差估计精确度, 长期以来都是时差估计研究的重点, 但针对时差估计方法的研究已经趋于成熟, 而目前一些应用场合开始愈加关注时差估计的代价问题^[1-2], 比如基于资源较少、能力较弱的传感器节点实现的时差估计对能耗、传输

收稿日期: 2012-10-08; 修回日期: 2012-11-29

基金项目: 国家科技重大专项基金资助项目(2010ZX03006-002)

和处理时延等要求十分苛刻,因此这种情况要求必须追求时差估计的良好综合性能。时差估计方法可以分为两大类: a) 直接法,即把在 2 个空间分离地点于同一时间接收的同一信号汇总,直接对信号的到达时差作出估计; b) 间接法,即先在 2 个地点对接收信号的某一相同特征点的到达时刻各自作出估计,再将 2 值汇总作差作为时差估计。间接法相比直接法虽然只需要传输很少的数据量,但是一般只对特定类型的信号适用,并且估计精确度通常不能满足类似高精度时差定位场合的应用需求^[3-5],因此针对直接法的数据压缩研究具有重要的理论价值和实践指导意义。

文献[1]推导了对白高斯随机信号和噪声进行有损压缩的率失真函数。文献[6]分析了基于重建信号均方误差(Mean Square Error, MSE)最小化准则的块自适应标量量化方法,该类方法的主要特点是以 MSE 作为重建信号的失真度量,这仍然是基于传统的面向信号重建的数据压缩思想,而在时差估计精确度与信号特征结构之间的内在联系上缺少进一步的分析。文献[7]从频域的角度推导了时差估计的克拉美罗界(Cramer-Rao Bound, CRB),简化了原本复杂的 CRB 问题。文献[8]则根据时差估计的 CRB,提出用低通滤波结合量化的方法对信号进行压缩,获得了一定效果。文献[9]在此基础上提出了一种新的失真度量方式,这种方式同时考虑了信号均方根带宽和有效信噪比,更本质地反映了信号的压缩对时差估计精确度的影响;对信号的变换域量化预先进行比特分配是实现数据压缩的另一种可能途径。文献[10]提出基于费舍尔信息量(Fisher Information, FI)最大化准则,对信号的离散傅里叶变换(Discrete Fourier Transform, DFT)数据进行变比特量化,在限定总比特数下实现最优的时差估计精确度,从而将面向时差估计的比特分配研究推向了一个高峰,同时也为基于 FI 最大化准则的数据压缩研究奠定了良好基础,然而变比特量化的压缩方法在一些特殊场合的工程实现上本身就具有相当的难度,比如对于资源和能力十分有限的传感器节点几乎不可能设计和实现这种压缩,尽管有学者后续提出了更加高效的比特分配方法^[11],但有效编译码方式的设计和实现问题仍然没有得到较好解决,导致该类方法的实际压缩性能和实用性大打折扣。另外需要指出的是,目前针对窄带通信信号在面向时差估计方面的数据压缩研究比较缺乏。

本文首先从提高面向时差估计的数据压缩方法的实用性出发,将压缩主要体现在易于实现的对信号的 DFT 数据抽取上,而量化阶段采取常规的等比特量化,从而大幅度降低量化器和后续编译码设计、实现的难度,其次通过分析窄带通信信号经过子带抽取压缩后的时差估计 CRB,得出在相同子带带宽下,时差估计 CRB 最低的子带基本对应信噪比最高的子带的结论,从而将复杂的基于 FI 最大化准则近似为简单的基于 DFT 幅值平方和最大化准则,然后通过进一步分析有限观测时间对基于子带抽取信号重建的影响,提出用频点抽取结合子带抽取的方法进行信号的压缩,从而在相同的数据传输量下,用计算量的少量增加换取最终时差估计精确度的较大提高。

1 模型假设

为了便于描述问题,本文将应用场景设置为基于传感器节点的时差估计,同时本文主要关注的对象是电磁信号,文献[12]详细分析了对电磁辐射源的无源定位与传统的声源无源定位之间的差异,指出对接收的电磁信号应建模为伴有随机噪声的确定性信号。因此从某一缓慢运动或静止辐射源发出信号 $s(t)$,于 2 个空间分离的固定节点对其先后进行接收,在不考虑信号传输时延和幅度衰减的情况下,可等效表示如下:

$$x_1(t)=s(t)+n_1(t), \quad x_2(t)=s(t-d)+n_2(t) \quad (1)$$

式中: $n_1(t)$ 和 $n_2(t)$ 为实高斯白噪声,且互不相关; d 为信号到达时差。信道环境缓慢变化,信号和噪声特性、以及 d 在有限观测时间 T 内被认为保持不变。假设在 2 节点完成信号接收后,节点 1 向节点 2 发送数据,最终在节点 2 完成时差估计,见图 1。

由式(1), 2 个节点接收信号的连续傅里叶变换表示如下:

$$X_1(f)=S(f)+N_1(f), \quad X_2(f)=S(f)e^{-j2\pi fd}+N_2(f) \quad (2)$$

实际处理中,需要先对信号进行采样频率为 f_s 、采样点数为 $N(N=2^M, M$ 为正整数,且满足关系式 $f_s T=N$)的采样,再作 N 点离散傅里叶变换,表示如下:

$$X_1(k)=S(k)+N_1(k), \quad X_2(k)=S(k)e^{-j2\pi \frac{f_s}{N}d}+N_2(k), \quad k=0,1,\dots,N-1 \quad (3)$$

2 压缩准则的简化

在正交变换域对信号进行量化和传输是实现数据压缩的重要处理方式,而对信号的 DFT 数据进行量化和传

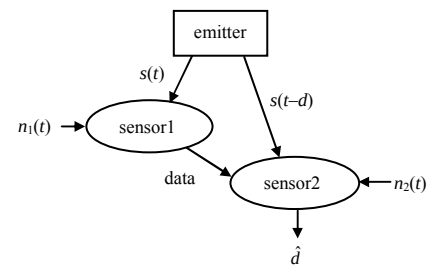


Fig.1 Model of TDOA estimation based on sensors
图 1 基于传感器节点的时差估计模型

输是一种常用的方法。节点间的通信带宽和对传输时延的限定决定了节点待传的总比特数上限,而在给定的等比特量化方式下,也就决定了节点所能传输的 DFT 数据的点数上限,因此在 DFT 点数大于尤其远大于该上限值的情况下,对信号的 DFT 数据进行抽取成为数据压缩的必然要求。

由于式(3)中的 $X_1(k)$ 和 $X_2(k)$ 具有条件共轭对称性,且 N 一般取偶数,所以只需从 $X_1(k)$ 和 $X_2(k)$ 的前 $N/2+1$ 个点中抽取 m 个相邻点,由不同的抽取起始点选择构成共 w 种可能的抽取方式($w = N/2 - m + 2$)。因为这种连续频点的抽取本质上与滤波相同,所以将其称为子带抽取。若抽取子带 $X_1^i(k)$ 和 $X_2^i(k)$ ($i \in \{1, 2, \dots, w\}$), 对应抽取起始点为 $k=i-1$ 进行时差估计,根据文献[8]的讨论结果可以推导出此时时差估计的 CRB 表达式。

假设在两节点完成信号接收后,节点 1 向节点 2 发送数据,最终在节点 2 完成时时差估计。 $X_1(k)$ 由抽取子带 $X_1^i(k)$ 进行传输,其中包含 m 个相邻点 $\{X_1(l_1), X_1(l_2), \dots, X_1(l_m)\}$, 在节点 2 被接收并恢复如下:

$$X_1^i(k) = \begin{cases} X_1^i(k), & k = l_1, l_2, \dots, l_m \\ (X_1^i(N-k))^*, & k = N-l_m, N-l_{m-1}, \dots, N-l_1, \text{且 } \frac{N}{2} + 2 \leq k \leq N-1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

由式(4)进一步通过离散傅里叶逆变换得到重建信号:

$$x_1^i(n) = IDFT[X_1^i(k)], \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (5)$$

同样,节点 2 在本地对 $X_2(k)$ 做与上面一致的处理得到 $x_2^i(n)$, 2 节点的抽取子带所在频谱范围相同。

此时,重建信号的带宽为 $B = mf_s/N$, 观测时间长度 $T = N/f_s$ 不变,有效信噪比为:

$$R_{SN, \text{eff}} = R_{SN}^2 / (1 + 2R_{SN}) \quad (6)$$

以重建信号 $x_1^i(n)$ 为例,其中有用信号 $s^i(n)$ 的功率为:

$$P_s = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |s^i(n)|^2 = \frac{2}{N^2} \sum_{k=l_1}^{l_m} |S(k)|^2 \quad (7)$$

此时的噪声功率包含外部噪声功率和量化噪声功率,所以有:

$$P_n = n_0 B + \sigma_q^2 \quad (8)$$

式中: n_0 为外部噪声的单边功率谱密度; σ_q^2 为量化噪声功率。由式(7)和式(8)得到信噪比:

$$R_{SN} = P_s / P_n \quad (9)$$

此时的信号均方根带宽 B_{rms} 满足^[13]:

$$B_{\text{rms}}^2 = \frac{\sum_{k=l_1}^{l_m} \left(\frac{f_s k}{N} - f_0 \right)^2 |S(k)|^2}{\sum_{k=l_1}^{l_m} |S(k)|^2} \quad (10)$$

式中

$$f_0 = \frac{\sum_{k=l_1}^{l_m} \frac{f_s k}{N} |S(k)|^2}{\sum_{k=l_1}^{l_m} |S(k)|^2} \quad (11)$$

因此,综上所述可以得到此时的时差估计 CRB 表达式:

$$\text{var}(\hat{d}) \geq \frac{1}{(2\pi B_{\text{rms}})^2 BT \times R_{SN, \text{eff}}} \quad (12)$$

由于在代价有限场合不适合运用计算复杂度高、对数据量要求大的方法进行时差估计,所以本文拟采用的时差估计方法为互相关法,由于互相关法被证明为渐近最大似然估计^[14],所以用时差估计的 CRB 代替实际均方误差对数据压缩进行指导是合理的。期望经过子带抽取压缩后的时差估计均方误差最低,也就等价于期望具有最低的 CRB。

常见的窄带通信信号具有带宽较小、幅度谱非平坦的特性,在进行子带抽取后,重建信号带宽将变得更小。下面以数字通信中具有代表性的 MPSK 信号为例分析时差估计 CRB 与子带抽取之间的关系。

设信号类型为 8PSK 信号, 载频为 1 MHz, 码元速率为 1 MBd, E_b/n_0 分别为 0 dB, 5 dB 和 10 dB, 取采样频率为 4 MHz, 采样点数为 4 096 点, 对信号 DFT 数据的实部和虚部均作 14 bit 均匀量化, 取压缩比(即抽取比)为 16:1。在截断效应和频谱混叠可以忽略的情况下, 时差估计 CRB、重建信号均方根带宽 B_{rms} 、有效信噪比 $R_{\text{SN,eff}}$ 三者与子带抽取起始点的关系分别如下:

由图 2 和图 3 可以看出, 对窄带通信信号进行相同带宽、不同起始点的子带抽取, 对于带宽很小的重建信号的均方根带宽 B_{rms} 在有效信噪比 $R_{\text{SN,eff}}$ 最高处取得了最大值。因此, 由式(12)可以得出, 最小化 CRB 等价于最大化 B_{rms} 的平方与 $R_{\text{SN,eff}}$ 之积, 进一步, 也就等价于最大化 $R_{\text{SN,eff}}$ 。由图 3 和图 4 可以看出, 时差估计 CRB 取得最低的子带抽取起始点基本对应着最高的有效信噪比 $R_{\text{SN,eff}}$, 因此也印证了这一点。而由式(6)~式(9)可以得出, 最大化 $R_{\text{SN,eff}}$ 等价于最大化 R_{SN} , 进一步也就等价于最大化抽取子带的 DFT 幅值平方和。众所周知, CRB 与 FI 互为倒数关系, 因此从简化对窄带通信信号的压缩准则考虑出发, 可以将文献[10]中比较复杂的基于 FI 最大化准则合理地近似为简便快捷的基于 DFT 幅值平方和最大化准则, 即: $\max_{i \in \{1, 2, \dots, w\}} \{B_{\text{rms}}^i R_{\text{SN,eff}}^i\}$, $\rightarrow \max_{i \in \{1, 2, \dots, w\}} \left\{ \sum_{k=i-1}^{i+m-2} |S(k)|^2 \right\}$ 。 B_{rms}^i 和 $R_{\text{SN,eff}}^i$ 分别表示第 i 种子带抽取方式的重建信号均方根带宽和有效信噪比。在有噪声的情况下, 实际的压缩准则应表示为 $\max_{i \in \{1, 2, \dots, w\}} \left\{ \sum_{k=i-1}^{i+m-2} |X_1(k)|^2 \right\}$ 。

3 压缩方法的改进

在对信号的实际处理中, 延长观测时间总会给时差估计带来精确度上的提高, 然而受节点资源和能力的限制以及对能耗、时延指标的要求, 观测时间长度只能被设置在一个允许范围内。在这种情况下, 信号的 DFT 结果可能存在严重的截断效应, 尽管这是一个数字信号处理领域早有的结论, 但在基于 DFT 的面向时差估计的数据压缩研究方面, 这种影响在过去一直未得到重视。

在没有外部噪声的情况下, 由信号的有限观测时间带来的谱间干扰相当于一种人为引入噪声, 这种噪声直接导致信号频谱发生畸变, 图 5 为上文举例信号的单边幅度谱。

当进行基于子带抽取的数据压缩时, 希望通过某种途径尽可能减小由谱间干扰带来的影响, 以获得质量更高的重建信号用以提高时差估计精确度。实验证明, 应用各种形状的窗函数代替矩形窗的办法并不能带来实质性的改善, 同时由于时差估计需要保留信号的相位信息, 所以无法用近代谱估计的方法减小这种影响^[15]。值得注意的是, 谱间干扰的影响程度在不同的频点上有所不同, 并且可以合理地认为, 若在某一频点上的 DFT 幅值较大, 则该频点受谱间干扰的影响程度通常较小。因此可以先将子带抽取范围适当放大, 然后再根据压缩指标从已抽取的子带中二次抽取 DFT 幅值相对较大的若干频点, 作为待传输的 DFT 数据。

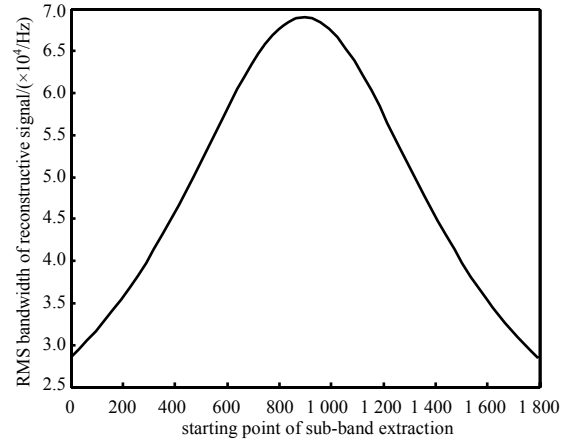


Fig.2 Relationship between RMS bandwidth of reconstructive signal and starting point of sub-band extraction
图2 重建信号均方根带宽与子带抽取起始点的关系

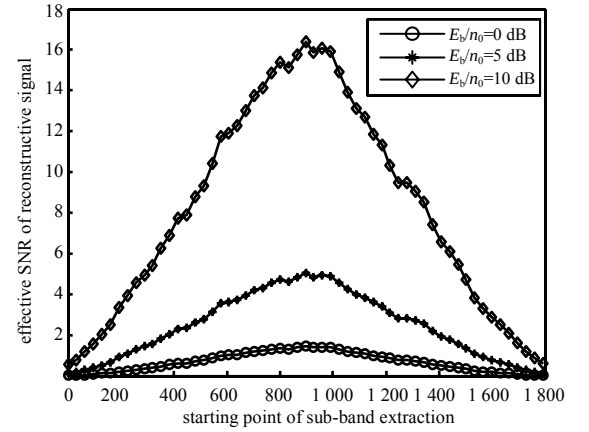


Fig.3 Relationship between effective SNR of reconstructive signal and starting point of sub-band extraction
图3 重建信号有效信噪比与子带抽取起始点的关系

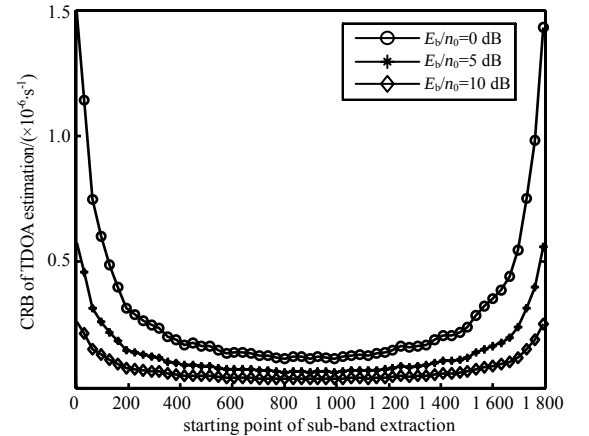


Fig.4 Relationship between CRB of TDOA estimation and starting point of sub-band extraction
图4 时差估计 CRB 与子带抽取起始点的关系

设子带抽取的点数被放大至 cm , 放大因子 c 通常取 2~4 即可。先按照准则 I 初步抽取子带:

$$\text{准则 I: } \max_{i \in \{1, 2, \dots, \frac{N}{2} - cm + 2\}} \left\{ \sum_{k=i-1}^{i+cm-2} |S(k)|^2 \right\}$$

i 取定后, 按照准则 II 进一步抽取幅值相对较大的 m 个频点:

$$\text{准则 II: } \max_{L=\{l_1, l_2, \dots, l_m\} \subseteq I} \left\{ \sum_{v=1}^m |S(l_v)|^2 \right\}, \quad I = \{i-1, i, \dots, i+cm-2\}$$

需要说明的是, 单纯的子带抽取只需要传输抽取起始点位置这一辅助数据, 而二次抽取后的频点却不一定相邻, 所以还需将抽取的每一个频点的位置信息进行传输, 而实际可采取传输抽取频点的位置增量信息。最后, 为保证总的数据传输量仍然满足压缩指标, 可采取以下 2 种方法进行解决:

a) 保持频点的抽取数量不变, 但适当减少频点数据的量化位数, 将剩余的比特用来传输位置信息; b) 保持频点数据的量化位数不变, 但适当减少频点的抽取数量, 将剩余的比特用来传输位置信息。

4 仿真分析

以窄带通信信号中常见的 MPSK 信号为例, 在 Matlab 环境下进行仿真实验和性能分析。

设信号类型为 8PSK 信号, 载频为 1 MHz, 码元速率为 1 MBd, 取采样频率为 4 MHz, 采样点数为 4 096 点。分别取压缩比为 32:1 和 64:1, 采用互相关法进行时差估计, 主要将以下几种情况的时差估计均方根误差进行比较: a) 不压缩; b) 采用子带抽取法进行压缩; c) 采用本文提出的子带抽取结合频点抽取的方法进行压缩; d) 采用实际考虑了传输频点位置信息的本文方法进行压缩。

在采用本文方法进行压缩时, 取放大因子 c 为 3, 在不考虑传输频点位置信息的情况下对信号 DFT 数据的实部和虚部均作 14 bit 均匀量化, 而在考虑传输频点位置信息的情况下, 采用保持压缩比不变, 对信号 DFT 数据的实部和虚部均作 10 bit 均匀量化, 将每个频点剩余的 8 bit 集中起来用以传输频点位置的增量信息。对 2 种压缩比的情况均进行 10 000 次蒙特卡洛实验, 得到仿真结果见图 6。

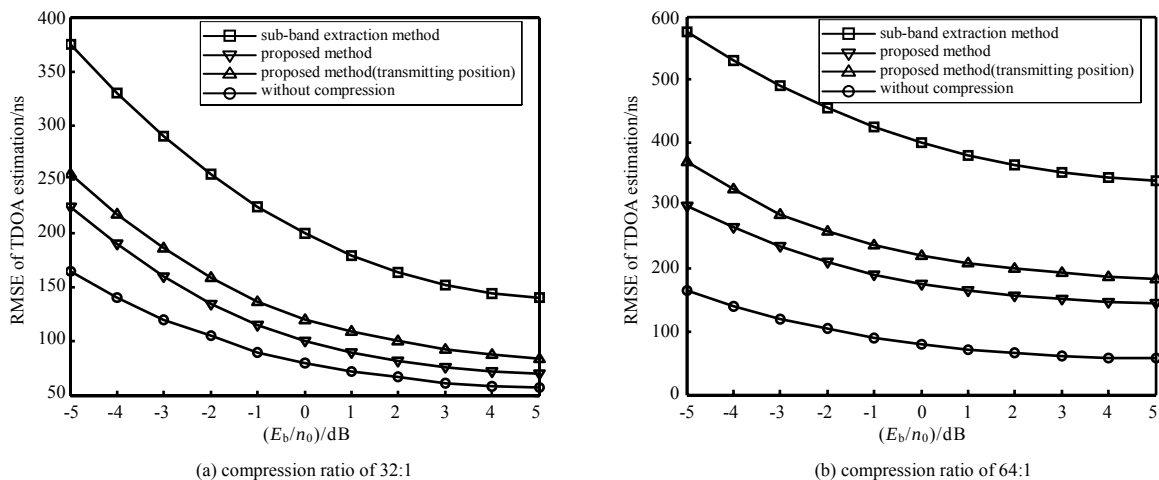


Fig.6 Comparison of TDOA estimation accuracy

图 6 关于时差估计精度的比较

图 6(a)说明, 在仅传输信号的 128 个频点 DFT 数据的情况下, 相比不压缩, 本文方法利用时差估计精确度的适度降低换取了传输数据量的大幅度减少, 而本文方法相比单纯的子带抽取法却利用计算量的适度增加换取了时差估计精确度的大幅度提高, 比如在 E_b/n_0 为 0 dB 时的时差估计均方根误差由 200 ns 左右被提高到了 100 ns 左右, 值得注意的是, 在 E_b/n_0 大于 0 dB 时, 均方根误差降低到了几十纳秒量级, 基本达到了时差定位类似场合对时差估计精确度的要求。当考虑实际需要传输被抽取频点的位置信息时, 时差估计精确度有所下降, 但仍然在可接受范围以内。图 6(b)说明, 随着压缩比的进一步提高, 采用本文方法的时差估计精确度也会进一步降低, 因

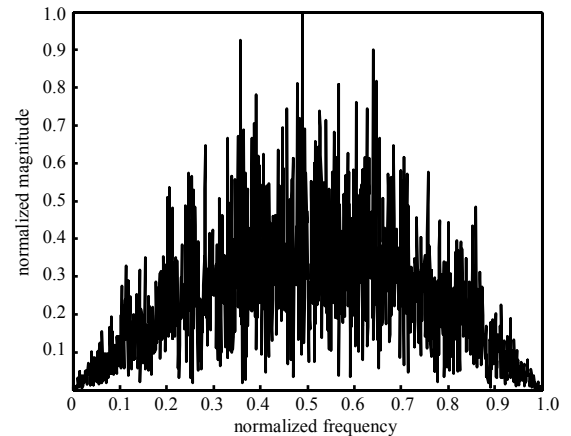


Fig.5 Single side magnitude spectrum of 8PSK signal

图 5 8PSK 信号单边幅度谱

此,在对节点间传输时延和最终时差估计精确度都有要求的情况下,需要计算出合适的数据传输量用来指导通信带宽的设计,以对有限的节点资源和能力不造成浪费。

5 结论

本文针对面向窄带通信信号时差估计的数据压缩的实用性问题进行了研究。首先将压缩主要体现在易于实现的对信号的 DFT 数据抽取上,而量化阶段采取常规的等比特量化,从而大幅度降低量化器和后续编译码设计、实现的难度,其次利用窄带通信信号的频谱特点,将复杂的 FI 最大化准则近似为简单的基于 DFT 幅值平方和最大化准则,以提高压缩效率,具有在有限代价场合利用其进行数据压缩的可行性,然后提出一种频点抽取结合子带抽取的改进压缩方法,经仿真验证,在相同的数据传输量下,该方法相比单纯的子带抽取方法较大程度地提高了时差估计精确度,保证了基本能够满足时差定位类似场合的应用需求。

参考文献:

- [1] Matthiesen D J, Miller G D. Data transfer minimization for coherent passive location systems[R]. Report No. ESDTR-81-129. Air Force Project No. 4110. 1981:9-34.
- [2] Patrik Hedström, Joel Arbring. On Data Compression for TDOA Localization[R]. FOI, Swedish Defense Research Agency, 2010:29-69.
- [3] 胡来招. 无源定位[M]. 北京:国防工业出版社, 2004:150-203. (HU Laizhao. Passive Locating[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004:150-203.)
- [4] 曾辉, 曾芳玲. 空间三站时差定位的模糊及无解问题[J]. 信息与电子工程, 2010, 8(2):139-142. (ZENG Hui, ZENG Fang ling. Ambiguity and non-solution problems of 3-D tri-station TDOA location systems[J]. Information and Electronic Engineering, 2010, 8(2):139-142.)
- [5] 解楠. 多站时差定位分析[J]. 信息与电子工程, 2003, 1(3):38-42. (XIE Nan. Precision Analysis of Time Difference Locating Technology Based on Multi-ground Stations[J]. Information and Electronic Engineering, 2003, 1(3):38-42.)
- [6] Fowler M L. Coarse quantization for data compression in coherent location systems[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2000, 36(4):1269-1278.
- [7] Benjamin Friedlander. On the Cramer-Rao Bound for Time Delay and Doppler Estimation[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1984, 30(3):575-580.
- [8] Fowler M L. Decimation vs. Quantization for Data Compression in TDOA systems[C]// Proceedings of SPIE. San Diego, CA: [s.n.], 2000, 4122:56-67.
- [9] Fowler M L. New Distortion Measures for Data Compression for Emitter Location[C]// Proceedings of The 35th Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers. Pacific Grove, CA, USA: [s.n.], 2001:658-662.
- [10] Fowler M L, Chen M. Fisher-Information-Based Data Compression for Estimation Using Two Sensors[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2005, 41(3):1131-1137.
- [11] Alireza Farrokh Baroughi, Ali-Asghar Beheshti Shirazi. Fisher Information Based Signal Compression in TDOA Estimation Application[C]// Proceedings of the 14th International CSI Computer Conference. Tehran: [s.n.], 2009:299-304.
- [12] Fowler M L, HU XI. Signal Models for TDOA/FDOA Estimation[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2008, 44(4):1543-1550.
- [13] HU Laizhao. Signal and Information[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010.
- [14] Steven M Kay. Fundamentals of Statistical Signal Processing[M]. 罗鹏飞, 张文明, 刘忠, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [15] DING Yumei, GAO Xiquan. Digital Signal Processing[M]. Xi'an: Xi'an Electronic Science and Technology University Press, 2000.

作者简介:



汪子嘉(1985-), 男, 重庆市人, 在读硕士研究生, 研究方向为基于无线传感网的无源定位技术. email: zijiawang1020@yahoo.cn.

于宏毅(1963-), 男, 呼和浩特市人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为通信信号处理、无线通信技术、自组织网络、无线传感器网络。

胡赞鹏(1978-), 男, 南昌市人, 博士, 讲师, 研究方向为通信信号处理、无线通信技术。