

文章编号: 2095-4980(2017)04-0585-05

基于 MSK 功率谱的巷道内宽度盲估计方法

张丹丹, 陈洪义, 刘芳, 徐琪, 潘鸣

(中国电子科技集团公司 第 50 研究所, 上海 200331)

摘要: 针对传统无线电导航定位系统中需要 2 个发射台进行精确定位距离的问题, 利用最小频移键控(MSK)信号谱线的特点, 可以测量接收设备与单个发射台的距离; 针对无线电定位系统受信号质量和信道环境的影响而定位精确度不高的问题, 本文对单一发射台的 MSK 信号频谱做平方处理, 利用 2 根谱线的相位差与空间传输距离的线性关系来提高定位精确度。该方法不依赖于信号的同步, 可做到盲估计巷道内的宽度。仿真结果表明, 在信噪比大于 0 dB 的信道环境下, 测量精确度达到 150 m 以内。

关键词: 导航; 定位; 最小频移键控; 盲估计

中图分类号: TN96

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201704.0585

One blind estimation algorithm of propagation distance less than code width based on MSK power spectrum

ZHANG Dandan, CHEN Hongyi, LIU Fang, XU Qi, PAN Ming

(The 50th Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Shanghai 200331, China)

Abstract: Because of the traditional radio navigation and positioning system depends on two transmitters to precisely measure distance, Minimum Shift Keying(MSK) signal is utilized to measure distance between receiving equipment and signal transmitter. In order to minimize the impact of the signal quality and channel environment on the radio system, the spectrum of MSK signal is squared to get phase difference between two spectral lines of two frequency points. Utilizing the linear relation of phase difference and space transmission distance improves the precision of measurement. The method completes the blind estimation of propagation distance less-than code-width and does not depend on the signal synchronization. The simulation results show that, under the channel environment of more than 0 dB, the accuracy of distance estimation is less than 150 m.

Keywords: navigation; positioning; Minimum Shift Keying; blind estimation

海空导航、车辆运行、大地测量等都需要精密定位, 为此人们建立了多种类型的无线电导航定位系统^[1]。甚低频通信由于电磁波波长较长, 信号在大气中的传播损耗小, 信号幅度与相位相对稳定, 并能渗入一定深度的土壤和海水, 能被水下或地下的接收设备所接收, 因此广泛应用于传统无线电导航定位系统中^[2-6]。最小频移键控(MSK)信号是一种二进制频移键控(Binary Frequency Shift Keying, 2FSK)的改进信号, 并且具有许多其他窄带调制方式所不能比拟的优越性, 它具有包络恒定、相位连续、带宽较窄、频谱主瓣能量集中、旁瓣滚降衰落快、频谱利用率高的特点, 该类调制方式被广泛用于无线电导航定位系统中^[7-10]。

传统的罗兰 C 导航定位系统由设在地面的 1 个主台和 2 至 3 个副台组成的台链和接收设备组成^[11-13]。通过测量主副台发射的 2 个脉冲信号的时间差和 2 个脉冲信号中载频的相位差, 来获得接收设备到主、副台的距离差; 利用双曲线定位原理确定出接收设备的位置。由于测量时间差而得到距离差的测量精确度不高, 只能起到粗测作用。为了提高测量精确度, 需要利用 2 个脉冲信号中载频的相位差与信号空间传输时间成正比的特点, 测量 2 个发射信号载频的相位差。这就需要主、副台发射的载频信号具有严格相同的频率和初始相位, 对发射台的要求较高, 同时, 2 个载波相位差的测量受符号同步精确度的影响。为了解决上述问题, 本文将单一发射台的 MSK 信号频谱进行平方, 利用频谱中 2 根谱线的相位差与空间传输距离成正比的关系, 来提高定位精确度。该方法测

量巷道内宽度时,仅需要单个发射台的信息,不需要额外接收另一发射台的发射信息。同时,该方法不需要符号同步,只需要完整倍数的码元信息,即可对巷道内宽度进行盲估计。仿真结果表明,在信噪比大于 0 dB 的环境下,测量精确度达到 150 m 以内,而且符号同步对测量精确度影响较小。

1 盲估计工作原理

1.1 MSK 信号特征

接收设备接收的主台或副台的 MSK 信号可表示为:

$$S(t)=A\cos\left\{2\pi\left[f_c+\frac{f_b}{4}a(t)\right]t+\phi(t)\right\}+N \quad (1)$$

式中: A 为信号幅度; f_c 为信号载波; f_b 为信号的码速率; $a(t)$ 为信号码元序列; $\phi(t)$ 为各个码元对应的初始相位序列; N 为噪声。信号码元序列可表示为:

$$a(t)=\sum_n a_n g(t-nT_c) \quad (2)$$

式中: a_n 取值于 $\{\pm 1\}$; T_c 为基带数据的巷道宽度,即 1 个完整码元对应的时间长度。MSK 信号中的初始相位序列可表示为:

$$\phi(t)=\sum_n \phi_n g(t-nT_c) \quad (3)$$

式中 ϕ_n 为第 n 个码元的初始相位,为了保证各码元间相位的连续性,满足:

$$\phi_n=\phi_{n-1}+(a_{n-1}-a_n)n\pi/2=\begin{cases} \phi_{n-1} & a_n=a_{n-1} \\ \phi_{n-1}\pm n\pi, & a_n\neq a_{n-1} \end{cases}=\phi_0\pm k\pi \quad (4)$$

式中: ϕ_0 是信号初始时刻的码元相位; k 为某一整数。

MSK 信号的功率谱呈现连续谱线的单峰,没有明显的与相位相关的谱线,将接收到的 MSK 信号做平方得到:

$$\begin{aligned} S^2(t)= & A^2\cos^2\left\{2\pi\left[f_c+\frac{f_b}{4}a(t)\right]t+\phi(t)\right\}+N^2+2A\cos\left\{2\pi\left[f_c+\frac{f_b}{4}a(t)\right]t+\phi(t)\right\}N= \\ & \frac{A^2}{2}\cos\left\{4\pi\left[f_c+\frac{f_b}{4}a(t)\right]t+2\phi(t)\right\}+\frac{A^2}{2}+N^2+2A\cos\left\{2\pi\left[f_c+\frac{f_b}{4}a(t)\right]t+\phi(t)\right\}N \end{aligned} \quad (5)$$

忽略掉噪声和直流的影响,将式(3)和式(4)代入式(5),则:

$$\begin{aligned} S^2(t)= & \frac{A^2}{2}\cos\left\{4\pi\left[f_c+\frac{f_b}{4}a(t)\right]t+2\phi(t)\right\}=\frac{A^2}{2}\cos\left\{4\pi\left[f_c+\frac{f_b}{4}a(t)\right]t+\sum_n(2\theta_0\pm 2k\pi)g(t-nT_c)\right\}= \\ & \frac{A^2}{2}\cos\left\{4\pi\left[f_c+\frac{f_b}{4}a(t)\right]t+2\theta_0\right\} \end{aligned} \quad (6)$$

得到一个 2FSK 信号,其载波频率为 $2(f_c+\frac{f_b}{4})=2(f_c\pm\frac{1}{4T_c})$,令

$$f_1=2(f_c+\frac{f_b}{4}) \quad (7)$$

$$f_2=2(f_c-\frac{f_b}{4}) \quad (8)$$

可见平方后的功率谱在 2 个载频点上有明显的谱峰。令

$$F(f)=\int_{n\Delta t}^{(n+1)\Delta t} S^2(t)\exp(-j2\pi ft)dt \quad (9)$$

则频点 f 上的相位为

$$P(f)=\text{angle}[F(f)] \quad (10)$$

此过程可通过 FFT 变换实现。其中,FFT 变换操作为:

$$P=\text{sum}\left[Y(k)\exp(-j2\pi\frac{f}{f_s}k)\right] \quad k=0,1,2,\dots,N \quad (11)$$

其中 $f = 2(f_c \pm \frac{1}{4T_c})$ 。在 2 个载频点上求得相位为 $P(f_1)$ 和 $P(f_2)$,

根据式(5), 在 t 时刻,

$$P(f_1) = 2\pi f_1 t + 2\phi_0 \quad (12)$$

$$P(f_2) = 2\pi f_2 t + 2\phi_0 \quad (13)$$

由式(7)、式(8)、式(12)和式(13)可得,

$$t = \frac{P(f_1) - P(f_2)}{2\pi f_1 - 2\pi f_2} = \frac{P(f_1) - P(f_2)}{2\pi f_b} \quad (14)$$

该相位差与信号码速相同, 即与信号在单个码元时间内传输的距离呈线性关系, 可得到接收设备与主台或副台在单个码元时间内信号传输的距离。而且, 该相位差与信号的初始相位无关, 也不依赖于符号同步。此外, 获得该相位差只需接收单个发射台的信号, 而无需同时接收 2 个发射台的信息, 避免因 2 个发射台的时间基准、信号初始相位偏差和传输信道不同而带来的接收信号相位偏差影响。

1.2 系统算法设计

系统算法设计流程图如图 1 所示。假设多个发射台均在整秒时刻开始发送信号, 并且发台和收台在时间上精确同步。收台接收到信号时, 按不同的发射台频率滤除各个发射台的信号进行分别处理。首先, 通过接收信号的符号同步进行对应于码元整数倍时间的到达时间(Time Of Arrival, TOA)估计, 由于同步序列良好的自相关特性, 估计的时间误差在 1 个码元之内。

然后对 MSK 信号进行平方处理, 可在平方后的功率谱中得到 2 根突出的频谱谱线, 接着在这 2 根谱线的载频点上分别做 FFT 变换, 求得 2 个载频点上的相位。根据 2 根谱线的相位差和信号的空间传输时间呈线性关系, 即可精确确定距离码元边界的到达时间 ToA_1 。

根据该 ToA_1 和之前整秒间的时间差 ToA_0 , 即可确定收发台之间的距离。如果在接收的信号中有 3 个或 3 个以上的发射台信号, 利用上述方法, 分别测出接收设备与这几个发射台的距离, 就可以通过双曲线或圆-圆定位原理确定自己所处的位置^[14-19]。

2 仿真分析

2.1 仿真平台

图 2 是本文搭建的系统仿真平台, 包括发送部分和接收部分。其中发送部分包括信源模块、信道编码、MSK 调制和数模转换; 接收部分包括模数转换、同步、巷道内宽度估计和上位机。

系统的工作过程分为发送通路和接收通路。发送通路将信源产生的数据送入信道编码模块进行编码, 再经过 MSK 调制和数模转换后进入发射天线将信号发送出去。

接收通路通过接收天线将信号接收下来, 然后滤出发射台的信号, 再经模数转换变成可处理的数字信号, 该数字信号经符号同步处理后可得出信号从发信台传输到接收台所用的整信码元个数, 结合单个码元对应的传输时间, 可粗略估计出发信台到接收台的传输时间 TOA_0 。

同步后的信息再被送到巷道内宽度估计模块进行处理, 对 MSK 信号频谱做平方处理, 计算得到时间误差在一个码元之内的时间 TOA_1 , 即巷道内的宽度。最后将 TOA_0 和 TOA_1 信息上传到上位机做定位和修正等相关处理, 以获得精确的定位信息。

2.2 系统仿真条件

系统输入信号由随机信号源产生, 采用 1/3 卷积编码的编码方式, MSK 调制的载波频率为 300 Hz, 符号率

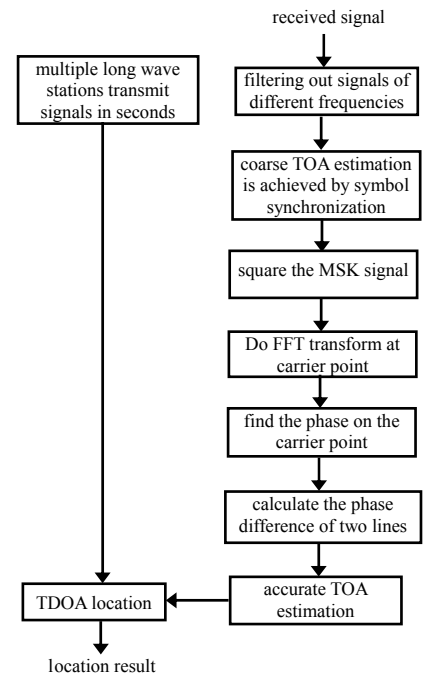


Fig.1 Flowchart of the system arithmetic design

图 1 系统算法设计流程图

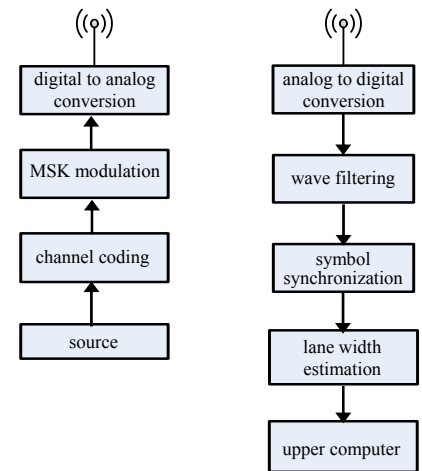


Fig.2 System simulation platform

图 2 系统仿真平台

为 50 sps(symbol per second), 采样频率为 1.4 kHz, 采用 M 序列作为符号同步头序列, 信道采用高斯白噪声 AWGN 信道。其中, 符号同步采用本地序列和接收信号序列做互相关求峰值的方法。如果相关峰值大于预设的阈值, 即完成了符号同步。图 3 为将 MSK 信号平方后的功率谱峰图, 可以看出有 2 根明显的谱线。

3 仿真结果

选取 MSK 信号的初相为 0.7π , 载波初相为 0.5π , 码元长度为 200 个, 即单次仿真时间为 4 s, 信噪比从 -15~30 dB, 分别仿真 5 000 s, 3 600 s 和 8 600 s 这 3 种测量时间下, TOA 误差在不同信噪比下的平均值, 见图 4。信噪比为 0 dB 时, 估计的测量时间与预设时间的误差为 $0.36 \mu\text{s}$, 换算成距离误差为 $0.36 \mu\text{s} \times 3 \times 10^8 \text{ m/s} = 108 \text{ m}$ 。

图 5 是对比加入同步和未加入同步对测量误差影响的仿真曲线, 可知符号同步对巷道内宽度的估计影响较小, 可以忽略。由此可知, 本文提出的利用 MSK 平方后的功率谱精确测量收发台间到达时间的方法, 不依赖于符号同步, 可以做到盲估计。这样不仅利用国内发射台定位, 对于未知符号同步头的大量外台信号, 也可以用于定位。

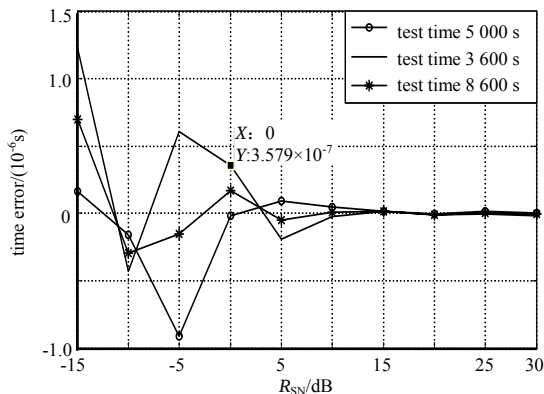


Fig.4 Time difference under different SNRs
图 4 不同信噪比下仿真的时间差

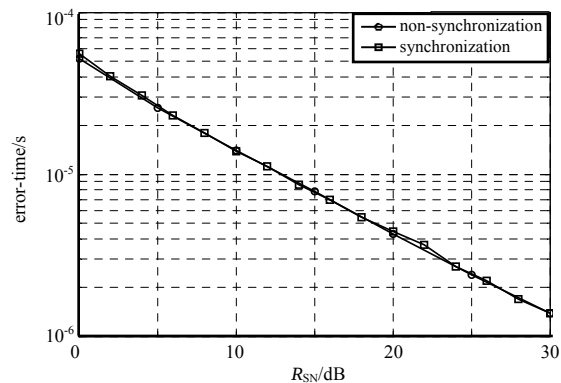


Fig.5 Measure error between synchronization and non-synchronization
图 5 加入同步与未加同步对测量误差影响

4 结论

本文采用对 MSK 信号做平方处理, 利用平方后的功率谱中 2 根明显谱线的相位差与空间传输距离呈线性的关系, 测量小于一个码元的信号传输时间, 来提高收发台的距离测量精确度, 即提高收发台的定位精确度。本方法无需对接收信号进行同步, 可对巷道内的宽度进行盲估计。同时, 只跟单个发射台的发射信号有关, 降低了对发射台的要求。此外, 该方法不依赖于信道的编码方式, 只跟信道的调制方式有关, 且降低了对信道环境的要求。

参考文献:

- [1] 李实锋, 王玉林, 华宇, 等. 罗兰-C 数据解调与解码技术研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 33(6): 1407-1413. (LI Shifeng, WANG Yulin, HUA Yu, et al. Research of Loran-C data demodulation and decoding technology[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 33(6): 1407-1413.)
- [2] 岳光荣, 刘志特, 杨国胜, 等. 水下甚低频 MSK 信号最大似然多符号差分分解调算法[J]. 电子科技大学学报, 2016, 45(4): 528-532. (YUE Guangrong, LIU Zhite, YANG Guosheng, et al. Maximum likelihood multiple symbol differential demodulation algorithms for underwater VLF MSK signal[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2016, 45(4): 528-532.)
- [3] 董颖辉, 蒋宇中, 张静. 基于 MSK 功率谱的甚低频发射系统频率特性研究[J]. 电波科学学报, 2010, 25(3): 597-602. (DONG Yinghui, JIANG Yuzhong, ZHANG Jing. Frequency characteristic for VLF transmit antenna based on MSK power spectrum[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2010, 25(3): 597-602.)
- [4] 施意, 张爽, 张昕. 大气噪声对甚低频通信系统干扰仿真分析[J]. 通信技术, 2013, 46(9): 32-34. (SHI Yi, ZHANG Shuang,

- ZHANG Xin. Simulation and analysis of atmospheric noise interference on VLF/LF communication[J]. Communication Technology, 2013,46(9):32-34.)
- [5] 曾显华,王华力,王学玲. 甚低频通信系统中 Alpha 稳定分布噪声干扰分析[J]. 通信技术, 2016,49(1):43-47. (ZENG Xianhua,WANG Huali,WANG Xueling. Alpha stable distribution noise interference in VLF communication[J]. Communication Technology, 2016,49(1):43-47.)
- [6] 郭福成. 基于 TOA 和 DOA 的固定单站无源雷达跟踪方法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015,13(6):908-912. (GUO Fucheng. Tracking algorithm of fixed mono-station passive radar using TOA and DOA[J]. Journal of Terahertz Science and Electronics Information Technology, 2015,13(6):908-912.)
- [7] 李锐,曾大治,龙腾. 卫星导航信号 MSK-DBOC 调制方式研究[J]. 信号处理, 2012,28(12):1656-1662. (LI Rui,ZENG Dazhi, LONG Teng. Study on MSK-DBOC modulation for GNSS signal design[J]. Signal Processing, 2012,28(12):1656-1662.)
- [8] LIU Wei, DU Gang, ZHAN Xingqun, et al. MSK-Binary coded symbol modulations for global navigation satellite system[J]. IEICE Electronics Express, 2010,7(6):421-427.
- [9] 孟凡玮,滕振宇,周帆. 一种 MSK 信号调制识别方法研究[J]. 计算机仿真, 2014,31(5):183-186. (MENG Fanwei, TENG Zhenyu, ZHOU Fan. Research on modulation recognition method of MSK signals[J]. Computer Simulation, 2014,31(5):183-186.)
- [10] 任席闯,严烁. 甚低频通信的 MSK 与 MFSK 性能比较分析[J]. 舰船科学技术, 2016,38(6):151-153. (REN Xichuang, YAN Shuo. The performance comparison between MSK and MFSK modulation of VLF communication[J]. Ship Science and Technology, 2016,38(6):151-153.)
- [11] 唐金元,王春雷,王翠珍. 罗兰-C 系统多台链接收机定位解算算法[J]. 航空计算技术, 2013,43(2):72-75. (TANG Jinyuan, WANG Chunlei, WANG Cuizhen. Positioning calculation methods of Loran-C navigation system with multiple station-chains receiver[J]. Aeronautical Computing Technique, 2013,43(2):72-75.)
- [12] 袁大天,陈亮,李太平. 罗兰-C 系统试飞中的 ASF 修正方法分析[J]. 现代电子技术, 2015,38(13):160-162. (YUAN Datian, CHEN Liang, LI Taiping. Analysis of ASF revision method in Loran-C system test flight[J]. Modern Electronics Technique, 2015,38(13):160-162.)
- [13] 王程峥,李文魁,高敬东,等. 长河二号系统海上定位精度预测与实验研究[J]. 中国航海, 2012,35(3):23-26. (WANG Chengzheng, LI Wenkui, GAO Jingdong, et al. Precision prediction and experimental study of positioning precision of Changhe II system at sea[J]. Navigation of China, 2012,35(3):23-26.)
- [14] 王智,严建华,张洪源. 长河二号导航系统及其技术更新[J]. 数字通信世界, 2011(6):86-87. (WANG Zhi, YAN Jianhua, ZHANG Hongyuan. Changhe II navigation system and its technical update[J]. Digital Communication World, 2011(6):86-87.)
- [15] 刘睿,朱银兵,张婷. 中国南海区域罗兰-C 单台链双曲线的 GDOP 研究[J]. 船电技术, 2011,31(1):30-33. (LIU Rui, ZHU Yinbing, ZHANG Ting. Research on Loran-C South China Sea region single chain of hyperbola GDOP[J]. Marine Electric & Electronic Technology, 2011,31(1):30-33.)
- [16] 刘睿,高敬东,朱银兵. 交叉台链无线电导航定位中几何精度因子算法[J]. 测绘科学技术学报, 2011,28(2):98-100. (LIU Rui, GAO Jingdong, ZHU Yinbing. Algorithm of cross-stations radio navigation GDOP[J]. Journal of Geomatics Science of Technology, 2011,28(2):98-100.)
- [17] 杨冬,宋才水. 机动式地基无线电导航系统布站策略分析[J]. 现代防御技术, 2016,44(3):25-31. (YANG Dong, SONG Caishui. Deployment strategy analysis of motorized ground-based navigation system[J]. Modern Defense Technology, 2016,44(3):25-31.)
- [18] 杨俊峰. 时差定位模型与定位精度分析[J]. 电子测试, 2013(3):103-105. (YANG Junfeng. Analysis of TDOA location model and location precision[J]. Electronic Test, 2013(3):103-105.)
- [19] 俞志强. 四站时差定位精度分析[J]. 空军雷达学院学报, 2010,24(6):400-402. (YU Zhiqiang. Precision analysis of passive location of 4-station based on TDOA[J]. Journal of Air Force Radar Academy, 2010,24(6):400-402.)

作者简介:



张丹丹(1986-),女,河南省商丘市人,博士,主要研究方向为数字无线通信、嵌入式开发.email:zhangdandan789@126.com.

陈洪义(1977-),男,江西省余干市人,硕士,主要研究方向为无线通信.

刘芳(1989-),女,河南省开封市人,硕士,主要研究方向为无线通信、机器学习、导航.

徐琪(1967-),男,河南省新乡市人,主要研究方向为模拟电路设计、无线通信.

潘鸣(1958-),男,河南省新乡市人,博士生导师,主要研究方向为信号检测与处理、电磁探测定位系统、通信系统、光电遥感系统.