

基于虚拟基线的干涉仪测向改进方法

崔旭

(中国电子科技集团第三十研究所保密通信重点实验室, 四川 成都 610041)

【摘要】复杂电磁环境下对复杂电磁信号进行测向是电子信息侦测的必要手段。并针对传统数字相位干涉仪解模糊和天线布设等技术问题,根据干涉仪测向基本原理,提出了一种基于虚拟基线的相位干涉仪方法,并利用大数判决准则对干涉仪测向估计方法进行了改进,改善和提升了测向性能。通过理论分析与仿真验证了该干涉仪设计与改进方法的有效性、可行的,同时该方法有利于工程实时实现,对实际工程应用有重要的参考意义,尤其是多长基线和多种天线阵形式的干涉仪系统。

【关键词】相位干涉仪;虚拟基线;大数判决

【中图分类号】TN911.7; TN971.3

【文献标识码】A

【文章编号】1002-0802(2011)07-0089-03

Phase Interferometer Improvement based on Virtual Baseline

CUI Xu

(State Key Lab of Communication Security, Chengdu Sichuan 610041, China)

【Abstract】Complicated electromagnetic signal direction finding in the complex electromagnetic environment is necessary for electronic information detection. Considering technical difficulty in resolving angle ambiguity and antenna layout by the traditional digital phase interferometer, an applied phase interferometer method based on virtual baseline is proposed according to the basic principle of interferometer. By using the majority decision criterion to enhance the direction-finding performance, the direction estimation method is improved. Theoretical analysis and simulation results show that the interferometer design and improvement is effective and feasible. Meanwhile, this is beneficial to the real-time engineering implementation and is of reference significance in the practical engineering applications, particularly in phase interferometer with long-base and multi-antenna array form.

【Key words】phase interferometer; virtual baseline; majority decision

0 引言

数字式相位干涉仪是一项对辐射源实施测向定位的技术,具备测向精度高、测角范围宽、适应辐射源信号能力强、天线布阵灵活、结构相对简单和技术体制成熟等特点,具有较强的工程实用价值,在信息战/电子战无源探测、交通管制、无线电频谱管理等军民领域有着广阔的应用前景。

干涉仪基本的天线阵列为一维线阵,通常采用多个天线阵元构成多基线的配置形式,并且长短基线配合使用,长基线保证测向精度,短基线用于解相位模糊^[1]。在某些特殊的工程应用场合,由于环境对天线尺寸和安装条件的限制,且短基线要求两阵元的间距小于辐射源信号的二分之一波长,当干涉仪工作在较高频段时,短基线间距太小难以布设,并

收稿日期:2011-05-18。

作者简介:崔旭(1978-),男,工程师,主要从事通信与信息系统技术的研究工作。

存在互耦影响,导致多基线天线阵列工程实现难度较大。

现以一维线阵数字相位干涉仪为基础,通过多长基线系统构造虚拟基线作为短基线,完成相位解模糊,并对基于时域鉴相的测向估计方法进行改进,实现高精度测向。

1 相位干涉仪测向原理

数字干涉仪测向系统实际上是利用相邻阵元由于辐射源信号到达阵元的波程差而产生相位差,由相位差来进行到达角(DOA)计算。单基线测向原理如图1所示。

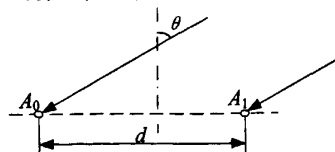


图1 单基线相位干涉仪

若有一平面电磁波从天线视轴(等强信号方向)夹角为 θ 的方向到达天线阵元 A_0 、 A_1 , 则两天线接收到的信号相位差为:

$$\varphi = (2\pi d/\lambda) \sin \theta, \quad (1)$$

式中, λ 为辐射源的信号波长; d 为两天线阵元间距; φ 为信号到达两天线阵元的相位差。式(1)经变换, 得:

$$\theta = \arcsin(\varphi \lambda / 2\pi d), \quad (2)$$

式(2)即为辐射源到达角的基本计算公式。式中, 若 $d > \lambda/2$ 是, 相位差 φ 可能会大于 2π , 出现相位多值模糊。

构建多基线相位干涉仪系统时, 通常需要利用短基线 ($d < \lambda/2$) 解决相位模糊问题。同时, 为保证高精度测向, 必需设计较长的基线, 以一维三基线相位干涉仪为例, 原理如图2所示。

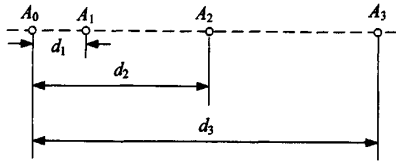


图2 多基线相位干涉仪原理

图中, 由四个阵元 A_0 、 A_1 、 A_2 和 A_3 构成三条基线, 长度分别为 d_1 、 d_2 和 d_3 。其中, d_3 为最长基线, 保证测向精度; d_1 为短基线, 与 d_2 配合用于逐次解相位模糊。根据式(1), 可得:

$$\varphi_{A_n} = (2\pi d_n / \lambda) \sin \theta = 2\pi k_n + \varphi_{\theta_n}, \quad (3)$$

式中, $k_n \leq d_n/\lambda$, $n=1, 2, 3$ 。 φ_{A_n} 是不同基线 d_n 的相位干涉仪产生的相位差, φ_{θ_n} 则为观测值。通过方程联立, 根据基线比值, 可以确定 k_n 值, 并由得到 k_3 求得 φ_{A_n} , 根据公式(2)计算出到达角 θ , 该 θ 值为该多基线相位干涉仪的最高精度测角值。

2 虚拟基线相位干涉仪测向原理

在工程应用中, 若采用长短基线配对使用的多基线干涉仪系统, 由于 d_1 值一般比较小, 尤其在对高频段辐射源测向时, 首先天线架设和安装比较困难, 其次天线阵元太近可能会带来天线互耦现象。若采用多长基线系统(无短基线), 主要问题集中在解模糊的问题上, 目前常采用的解决方法有两种:

- ①余弦定理解模糊方法;
- ②基于基线比多组相位差解模糊方法。

这两种方法在算法性能相当, 满足一般的测向要求, 但均存在缺陷^[2]。①方法1要求基线比互质, 解模糊时求整数解对鉴相误差比较敏感; ②方法2算法较为复杂, 需要进行多维搜索运算。两种方法存在同样问题: 多基线系统需要多组基线比条件实现解模糊, 一般地, 当阵元数 ≥ 5 个, 才能保证测向精度。在对天线阵列有尺寸限制的应用场合, 多长基线系统并不适合。

这里, 构造了一种非对称三元直线阵, 采用虚拟阵元的

办法来构造虚拟短基线, 达到解模糊, 从而实现测向, 原理如图3。

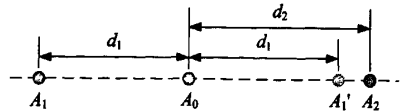


图3 非对称的虚拟阵元干涉仪

天线阵布置如图3所示。图中, A_0 为相位参考阵元, A_1 和 A_2 关于 A_0 非对称布置, 而 A_1' 为 A_1 关于 A_0 对称的虚拟阵元, 对于天线阵各基线长度的基本约束条件为:

- ① $d_2 > d_1 > \lambda/2$, 均为长基线设置, 保证测向精度;
- ② $d_2 - d_1 < \lambda/2$, 构造虚拟短基线, 实现相位解模糊。

测向处理流程大致如下:

- ①以 A_0 为参考阵元, 计算 $A_0 A_1$ 和 $A_0 A_2$ 的相位差 ϕ_{01} 和 ϕ_{02} , 此时该相位差均为模糊值;
- ②根据 ϕ_{01} 构造 A_1 关于 A_0 对称的虚拟阵元 A_1' 的相位差值 ϕ'_{01} ;
- ③变换以 A_2 为参考阵元, 以 ϕ_{02} 和 ϕ'_{01} 计算 $A_2 A_1'$ 的相位差 ϕ'_{21} 值, 此时该值为非模糊值(不考虑由于前面计算所得相位差模糊值关于值边界的模糊误差);
- ④根据基本的干涉仪测向原理, 利用 $A_0 A_1' A_2$ 组建长短基线系统, $A_2 A_1'$ 为短基线用于解模糊, $A_1' A_0$ 为长基线可实现测量来波关于干涉仪基线法线方向 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 的方位角。

该方法与传统的长短基线测向原理相似, 测向性能基本相当。

3 测向估计方法改进

数字相位干涉仪测向通常采用基于相位差解模糊的 DOA 估计算法, 为提高测向精度, 可采用基于余弦估值误差方差最小准则的 DOA 估计算法进行性能优化, 解模糊概率能提高大概 5 dB^[3]。但该方法多适用于多长基线系统, 测向性能对基线长度和数目均有一定要求。

基于虚拟基线的相位干涉仪系统在天线规模受限时, 测向性能的提升从消除测向数字计算误差入手。DOA 估值算法的核心是鉴相方法, 鉴相误差直接影响测向精度。鉴相方法包括时域鉴相和频域鉴相, 在高信噪比条件下, 两种方法性能相当, 在低信噪比条件下, 频域鉴相的性能较优^[4]。频域相对时域鉴相的性能提升, 主要体现在窄带滤波和误差平均的效果上, 频域鉴相方法性能与频谱变换后的频率分辨率有直接关系, 对信号采样率有一定要求。在针对高速测向或采集数据有限的背景下, 时域测向方法仍有相当的适用价值, 数据处理更加灵活。

若两阵元的相位差为 ϕ_{A_n} , 时域鉴相方法是对信号相位差进行累积平均, 即:

$$\bar{\phi}_{A_n} = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N \phi_{A_n}(m), \quad (4)$$

式中, N 为时域采样数据长度。时域测向方法在信噪比条件

下性能较差是由相位差估计值的最大绝对误差导致。根据公式(3),误差来自解模糊的 k_n 确定,由此,测向精度的改进可通过 k_n 对 $\phi_{k_n}(m)$ 的数据进行筛选获得。

处理过程大致如下:

①对时域采样数据进行逐点求相位差,得到短基线无模糊相位差 $\phi_{k_n}(m)$,进行解模糊计算,得到 $k_n(m)$;

②利用大树判决准则,从集合 $k_n(m)$ 确定标准值 \tilde{k} ;

③对 $k_n(m)$ 进行筛选,条件为 $k_n(m)=\tilde{k}$,得到新的解模糊无偏系数集合 $k'_n(m)$;

④选择 $k'_n(m)$ 对应的时域数据进行长基线相位差 $\phi_{k'_n}(m)$ 计算,通过公式(4)得到相位差累积平均值,并以此进行DOA估计。

由上,改进方法主要通过大数判决准则确定解模糊无偏系数,以此为标准尽量去除鉴相误差较大的数据,从而筛选出“非弱段”数据进行测向估计,保证测向精度。

4 仿真分析

信号调制样式:单音;信号载频:1.2 GHz;采样率:100 MHz;采样点数:1 000;测向阵采用虚拟基线三元线阵布置,如图3, $d_1=0.5\text{ m}$, $d_2=0.6\text{ m}$ 。

假定辐射源到达角为 25° 条件下,分别用基本的数字相位干涉仪方法和改进方法进行测向估计。仿真软件:Matlab;仿真次数:1 000次。得到测向性能曲线如图4。

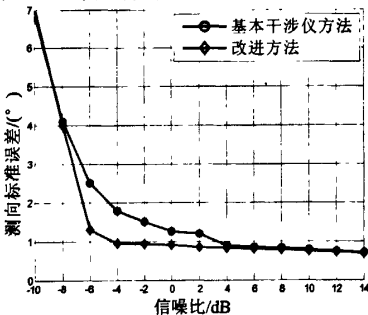


图4 测向性能仿真曲线

(上接第73页)

网。ZigBee的优点是网络容量大,功耗低,成本低、带控制功能,缺点是传输速度慢。这对于需要无线监控的物联网来说至关重要。

这里简要地叙述了三种通信协议的当前技术特点。事实上三大技术联盟仍然在不断改进自己的技术。Wi-Fi 联盟推进“Wi-Fi Direct”技术的允许两台Wi-Fi设备之间进行短距离高速点对点传输,这对于蓝牙技术来说几乎是致命的,同时其最新制定中的802.11ac和802.11ad标准,在保证传输距离不变的前提下,以Gb/s的数据传输速率。对此,蓝牙技术联盟则采用最新了4.0标准,新标准4.0版本不但加入了Wibree低功耗传输技术,同时加入了802.11物理层和MAC层,这样一来4.0版本的蓝牙就拥有了Wi-Fi的无线上

取辐射源达到角为 10° 、 45° 时,性能曲线趋势基本相似。通过基本干涉仪方法和改进方法的对比可以得到:

①改进方法在信噪比条件较高时,与基本干涉仪的测向性能相当;

②随着信噪比条件的降低,基本干涉仪方法的测向性能逐渐下降并迅速恶化,而改进方法在大数判决条件满足时仍能保持测向精度。但当信噪比条件恶化至一定程度,导致大数判决条件不成立,改进方法性能退化至与基本干涉仪一样。

5 结语

根据数字相位干涉仪原理,给出一种基于虚拟基线的数字相位干涉仪方法,能够解决测向精度和相位解模糊的矛盾,可消除了天线阵极小间距的限制;并通过从时域鉴相数据优化筛选,利用大数判决准则对干涉仪测向方法进行改进,可获得测向性能的改善和提升。理论分析与仿真验证了基于虚拟基线的数字相位干涉仪测向及改进方法的有效性,表明对于非弱段信号的测向,性能提升较为明显。基于虚拟基线的数字相位干涉仪及改进方法在工程上有着较强的实用前景。该方法能够应用在多长基线和不同天线阵形式的干涉仪系统中,测向性能可进一步得到提高。

参考文献

[1] 袁孝康. 相位干涉仪测向定位研究[J]. 上海航天, 1999(03):1-7.
[2] 龚享钰, 袁俊泉, 苏令华. 基于相位干涉仪阵列多组解模糊的波达角估计算法研究[J]. 电子与信息学报, 2006, 28(01):55-59.
[3] 魏合文, 王军, 叶尚福. 一种基于余弦函数的相位干涉仪阵列DOA估计算法[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(11):2665-2668.
[4] 李莉, 朱伟强. 数字干涉仪测向实时鉴相技术[J]. 航天电子对抗, 2005, 21(02):51-52.
[5] 蒋学金, 高遐, 沈扬. 一种多基线相位干涉仪设计方法[J]. 电子信息对抗技术, 2008, 23(04):39-45.

网功能,并且大大降低了功耗。可以预见Wi-Fi技术联盟和蓝牙技术联盟的竞争将越来越激烈。与此同时,随着全球的物联网应用发展,由德州仪器带领的技术联盟所开发的ZigBee芯片,拥有自己独特的传输距离长、功耗极低、控制能力突出的特点,一定也能得到大规模的应用。

参考文献

[1] John Kooker. Bluetooth, ZigBee, and Wibree. [EB/OL]. (2008-07-03) [2010-01-02]. http://johnkooker.com/blog/wp.../05/jkooker_BTZigBee_Wibree.pdf.
[2] 胡钢, 朱佳期, 陈世志. 无线传感器网络簇间节能路由算法[J]. 通信技术, 2009, 42(11):135-137.
[3] 刘玉红, 周冬梅, 邵军花, 等. Ad Hoc多播路由协议研究与实现[J]. 通信技术, 2010, 43(01):137-139.