

文章编号: 1672-2892(2011)01-0022-04

基于多普勒频率的机载测距原理

郁 涛

(中国电子科技集团公司 第五十一研究所, 上海 201802)

摘要: 基于数学定义, 通过对多普勒频移变化率方程的近似处理即可实现仅基于多普勒频移测量的机载单站测距。在此基础上, 进一步研究了在某一时间段内多普勒变化率的均值表达问题, 在机载探测平台匀速直线飞行条件下所进行的分析表明, 在某一时间段内多普勒变化率的平均值与此时段两端点处的切向速度之积成正比, 并与时段终端位置处的径向距离成反比, 且模拟计算证实由此表示才能获得更为准确的测距结果。与现有的方法不同, 本文提出的测距方法既不需要直接检测多普勒频移变化率, 也不需要和其它定位测量方法配合使用。同时, 基于文献[7]研究结果, 在探测得到被测目标辐射信号中心频率后, 即可实现仅基于频率测量的机载单站测距。本文的研究结果为直接利用多普勒原理准确测距奠定了工程应用基础。

关键词: 测距; 无源定位; 多普勒频率; 机载; 单站定位

中图分类号: TN958.97

文献标识码: A

Airborne ranging principle based on Doppler frequency

YU Tao

(No.51 Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shanghai 201802, China)

Abstract: According to mathematical definition, airborne single-station ranging only based on Doppler shift measurement can be realized by the approximation to Doppler changing rate equation. On this basis, the expressing of average for Doppler changing rate in a time interval is researched. On condition that airborne measuring station is in uniform linear flight motion, the analysis shows that the average value of Doppler changing rate is directly related to the product of tangential velocity at two terminals and is inversely relative to radial distance at end position in a time interval. And the analog calculation verifies that the better ranging result can be obtained only from this average expression. As contrasted to existing method, the ranging method derived in this text requires neither to detect Doppler changing rate directly nor to be used with other location method. At the same time, according to research effort in documentation, the airborne single-station ranging can be realized only based on frequency measurement after detecting and obtaining the measured signal center frequency. The result in this text has laid an application foundation for directly utilizing Doppler principle to realize accurate ranging.

Key words: range measuring; passive location; Doppler frequency; airborne; single observer location

根据定位理论, 基于现有的多普勒变化率方程应能直接获得在测量平台和被测目标之间的径向距离^[1], 但事实上, 仅基于多普勒变化率的定位法还不是当前电子战目标定位中的经典方法^[2-3], 其中的一个主要原因是目前对多普勒变化率的测量还是比较困难的。同时, 因多普勒变化率还直接与切向速度等参量相关, 故直接使用多普勒变化率方程测距所需面对的问题除了要测量多普勒变化率之外, 还必须测得探测平台移动方向和目标之间的前置角, 由此才能直接使用方程求解。因此, 在现有的定位方法中, 多普勒变化率定位法都必须与其他定位方法配合使用^[4-6]。

事实上, 如仅从多普勒变化率方程的基本定义出发, 则多普勒变化率可以近似由一时间段内的多普勒频差所确定, 本文所给出的研究结果表明, 基于这种简单的数学近似即能仅通过探测历经 Δt 时间段内的多普勒频移及其变化量实现对径向距离的测算, 如进一步引入均值概念则还能有效改善测量精确度。由于被测目标的辐射中心

频率可通过对辐射信号频率的实测而获得^[7],这就意味着机载单站无源测距亦可仅通过对辐射信号频率的实时探测而实现。

1 公式推导

1.1 测距算法

图 1 示出了一个在机载测量平台上实现多普勒无源测距的几何关系。在探测平台匀速运动的条件下,在某一径向距离上的多普勒变化率方程是:

$$\dot{f}_d = \frac{v_t^2}{\lambda r} \quad (1)$$

式中: v_t 为切向速度; λ 为信号波长; r 为径向距离。

从数学定义出发,在 Δt 时间段内,多普勒变化率可由端点间多普勒频差的测量值近似表示:

$$\dot{f}_d = \frac{\Delta f_d}{\Delta t} = \frac{f_d - f_{d0}}{\Delta t} \quad (2)$$

式中 f_{d0} 和 f_d 分别为始点和终点处的多普勒频移值。

综合上述 2 个公式,并利用速度矢量与其分量间的关系: $v^2 = v_r^2 + v_t^2$, 以及径向速度与多普勒频移间的关系: $v_r = \lambda f_d$, 即可得到如下的基本测距公式:

$$r = \frac{(v^2 - \lambda^2 f_d^2) \Delta t}{\lambda |\Delta f_d|} \quad (3)$$

事实上,多普勒变化率方程描述的仅仅是在某一瞬间、某一点上的多普勒变动状态,并不能准确反映在某一时间段内多普勒频移的平均变化状况。最近的研究^[8]已经证明,按基本物理定义和按平面几何关系所得出的速度测算结果是很不相同的,且由平面几何关系所得出的速度表达式能获得更准确的测算结果。

将多普勒频差用径向速度的形式表示,有:

$$\lambda(f_d - f_{d0}) = v(\cos \theta - \cos \theta_0) \quad (4)$$

式中: v 是载机测量平台的移动速度; θ_0 和 θ 分别是始点和终点处在移动方向和径向距离之间的前置角。

根据内外角之间的关系: $\theta = \theta_0 + \Delta \theta$, 并利用三角近似式: $\cos \Delta \theta \approx 1$ 和 $\sin \Delta \theta \approx \Delta \theta$, 对式(4)展开整理后有:

$$\begin{aligned} \lambda(f_d - f_{d0}) &= v(\cos(\theta_0 + \Delta \theta) - \cos \theta_0) = \\ &= v(\cos \theta_0 \cos \Delta \theta - \sin \theta_0 \sin \Delta \theta - \cos \theta_0) \approx \\ &= -v \Delta \theta \sin \theta_0 \end{aligned} \quad (5)$$

将其代入式(2),有:

$$\dot{f}_d = \frac{\Delta f_d}{\Delta t} \approx -\frac{v \Delta \theta \sin \theta_0}{\lambda \Delta t} \approx -\frac{v_{t0} \omega}{\lambda} \quad (6)$$

因角速度 ω 与旋转矢径 r 相关,即有:

$$r \omega = v_t \quad (7)$$

于是得:

$$\frac{\Delta f_d}{\Delta t} \approx -v_{t0} \frac{v_t}{\lambda r} \quad (8)$$

上式表明,在 Δt 时间段内多普勒变化率的平均值与区段内两端点处的切向速度之积成正比,即与两端点处的切向速度的几何平均值成正比,并与终端位置处的径向距离成反比。

利用速度恒等式及多普勒速度,即可得到测算精度有所改善的测距公式:

$$r = \frac{v_{t0} v_t \Delta t}{\lambda(f_{d0} - f_d)} = \frac{\sqrt{v^2 - \lambda^2 f_{d0}^2} \sqrt{v^2 - \lambda^2 f_d^2} \Delta t}{\lambda(f_{d0} - f_d)} \quad (9)$$

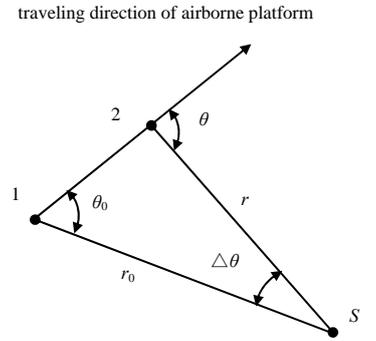


Fig.1 Airborne Doppler ranging
图 1 单机多普勒测距

1.2 仅基于频率测量的测距公式

如对于可合作目标,信号的波长就是已知的。对于空中无源定位,文献[7]给出了机载单站对辐射源中心频率的测频计算方法。

一旦得到信号波长,就能实现仅基于频率测量技术的机载测距方法,此时,由多普勒频移、信号的中心频率和信号频率的实测值之间的关系 $f_t = f_0 + f_d$, 多普勒频差值可由实测频差值计算:

$$f_d - f_{d0} = f_t - f_{t0} \quad (10)$$

式中 f_t 为探测平台接收端实测频率值。

最终得到的径向距离表示式为:

$$r = \frac{\sqrt{v^2 - \lambda^2(f_{t0} - f_0)^2} \sqrt{v^2 - \lambda^2(f_t - f_0)^2} \Delta t}{\lambda(f_{t0} - f_t)} \quad (11)$$

2 模拟验证

为验证测距公式的准确性,采用理论值取代测量值的方式进行数学模拟计算。预先设定波长 λ 、前置角 θ_0 、径向距离 r_0 、载机飞行速度 v 和飞行历经时间 Δt 或距离 L 的值,且使 θ_0 在规定的区域内连续变化,由此就能按图1所示的几何关系依次精确计算得到测量节点2位置处的前置角和径向距离,从而就能按多普勒方程精确计算出对应于各个径向距离的多普勒频移 f_{di} 的理论值。

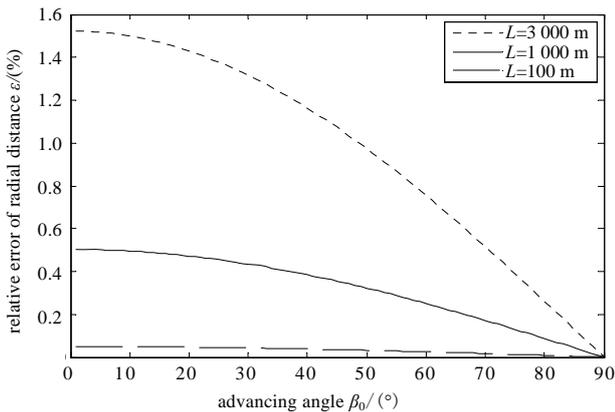


Fig.2 Error curve of radial distance against advancing angle at different displacements

图2 不同历经时间的径向距离随前置角的相对变化误差曲线

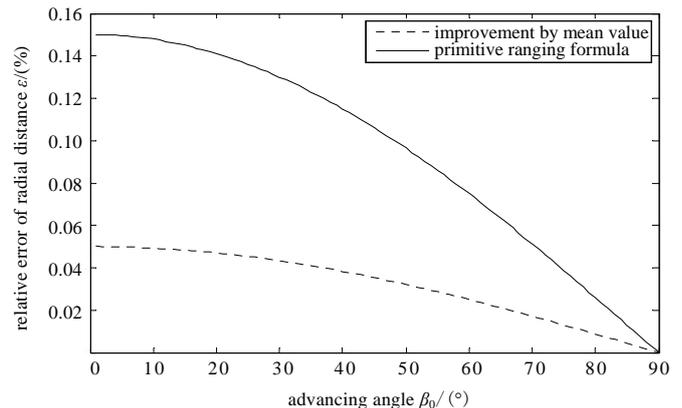


Fig.3 Improvement of accuracy by mean value

图3 均值处理对测算精度的改善

在此基础上,就可根据推导所得到的式(9)测算距离,并将其和原始的理论值作比较而得到相对计算误差。

在不加说明的情况下,测算所取的参数是:径向距离 $r_0 = 100$ km, 载机速度 $v = 100$ m/s, 载机空中移动距离 $L = 1000$ m(其等同于 $\Delta t = L/v$)。

图2给出了历经时间不同的情况下,距离测算值随前置角的相对误差变化曲线。图中已将时间换算为移动距离 L , 这亦等效对应于不同的张角 $\Delta\theta$ 。从中可见,在历经时间较小,其等效于移动距离或张角较小的情况下,模拟测算值具有更好的精确度。

模拟计算证明,改变载机测量平台的运动速度及波长的大小,对相对误差的模拟分析没有影响。

图3为经过均值化处理后模拟测算精度,与式(3)和式(9)的误差结果比较,显然有了较大的改善。

在进行模拟计算时必须注意的一个问题是测距式(3)或(9)分母中的多普勒频差一般必须采用绝对值。在两端点处多普勒频移的前后运算次序按第1章推导的方式确定时,不采用绝对值也能得到正确结果。

3 结论

本文的研究结果为直接利用多普勒测量准确测距奠定了工程应用基础。由于能通过频率测量实现测距,这不仅降低了机载定位探测设备的成本,而且也提高了定位探测的效率。除用于机载无源侦察定位之外,本文所给出的测距公式还能应用于许多方面,例如用于地面测量站对空中运动目标的有源探测。另一个很有性价比的设计是

应用于机载多普勒导航雷达,从而使现有的导航雷达不仅能测速,同时还能实现测距和测高^[9]。

参考文献:

- [1] 陆效梅. 单站无源定位技术综述[J]. 舰船电子对抗, 2003,26(3):20-23. (LU Xiaomei. Single Station Passive Location Technology Review[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2003,26(3):20-23.)
- [2] 孙仲康,郭福成,冯道旺. 单站无源定位跟踪技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2008. (SUN Zhongkang, GUO Fucheng, FENG Daowang. Passive location and tracking technology by single observer[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2008.)
- [3] 泊伊,理查德 A. 电子战目标定位方法[M]. 屈晓旭,译. 北京:电子工业出版社, 2008. (Poisel, Richard A. Electronic warfare target location methods[M]. Translated by QU Xiaoxu. Beijing: Electronic Industry Press, 2008.)
- [4] 周振,王更辰. 机载单站对机动目标无源定位与跟踪[J]. 电光与控制, 2008,15(3):60-63. (ZHOU Zhen, WANG Gengchen. Passive locating and tracking of maneuvering targets from single airborne observer[J]. Electronics Optics & Control, 2008,15(3):60-63.)
- [5] 陆志宏. 舰载电子战系统中对运动辐射源的单站无源测距定位技术[J]. 舰船电子对抗, 2007,30(2):16-19. (LU Zhihong. Single Station Passive Ranging Location Technology for Maneuvering Emitter in Shipborne EW System[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2007,30(2):16-19.)
- [6] 李宗华,肖予钦,周一宇,等. 利用频域和空域信息的单站无源定位跟踪算法[J]. 系统工程与电子技术, 2004, 26(5):613-616. (LI Zonghua, XIAO Yuqin, ZHOU Yiyu, et al. Single-observer passive location and tracking algorithms using frequency and spatial measurements[J]. Systems Engineering and Electronics, 2004,26(5):613-616.)
- [7] 郁涛. 机载站对辐射源中心频率的测频计算法[J]. 飞行器测控学报, 2009(6):20-23. (YU Tao. Measurement Frequency Computation of Centre Frequency for Radiant Applied to Single Airborne Observer[J]. Journal of Spacecraft TT & C Technology, 2009(6):20-23.)
- [8] 郁涛. 径向速度对角位移的变化率[C]// 2009年研究生学术交流会——通信与信息技术年会论文集. 北京:国防工业出版社, 2010. (YU Tao. Change Ratio of Radial Velocity to Angle Displacement[C]// Academic graduate student communication meeting in 2009—Proceedings of Annual Conference of Communication and information technology, National Defence Industry Press, 2010.)
- [9] Yu Tao. Speed Measurement Method for Doppler Navigation Based on Short-Baseline Linear Array with Three Elements[C] // Proceedings of Annual Conference of China Institute of Communications. USA: Scientific Research Publishing, 2009: 373-375.)

作者简介:



郁涛(1957-),男,上海市人,硕士,高级工程师,主要研究方向为无线电导航定位.email: tyt0803@163.com.