

高低轨双星定位中的时变时频差参数估计

杨宇翔 夏畅雄 同武勤

(盲信号处理重点实验室, 成都 610041)

摘 要: 针对卫星干扰源高低轨组合双星定位中, 同步和低轨卫星相对于干扰源的径向速度差值大、变化快, 引起的时频差定位参数时变的问题, 分析出同步、低轨卫星到干扰源的径向距离之差随时间的变化近似满足匀加速运动模型, 据此建立了两卫星平台接收信号的表达式, 解析了径向速度、加速度和加加速度差各自对信号包络和载频部分的影响, 并在此基础上结合互模糊函数提出了一种基于运动补偿的时变时频差参数估计方法, 仿真和试验结果表明了该方法能够有效消除运动参数的影响, 准确地估计出时频差定位参数, 并能逼近时差、频差估计精度的理论下界。

关键词: 同步卫星; 低轨卫星; 时变; 时差; 频差

中图分类号: TN911.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0530(2012)10-1465-10

Estimation of the Time Varying TDOA and FDOA in GEO-LEO Dual-satellites Location System

YANG Yu-xiang XIA Chang-xiong TONG Wu-qin

(National Key Laboratory of Blind Signals Processing, Chengdu 610041, China)

Abstract: To solve the problem that can't estimate the time varying TDOA (time difference of arrival) and FDOA (frequency difference of arrival) used to locate the interference source resulted from the high-speed movement characteristics of the low earth orbit satellite in Geo-Leo dual-satellites location system. It analyzed the variation of the radial distance difference relative to the interference source between the geostationary satellite and low earth orbit satellite, found it approximately matches Jerk model. Then it built the expressions of the two signals received by the two satellite platforms. After that, it discussed the influences to the envelope and carrier frequency of signals caused by the velocity difference, acceleration difference and jerk difference, showed what should be considered and what needn't. Finally, it gave a method of joint estimation the time varying parameters for location, which is via suppressing the influence of movement parameters and based on the Cross Ambiguity Function (CAF). The results of simulations and experiments show it can eliminate the effects of movement parameters effectively, estimate the location parameters accurately, and the estimation accuracy of the TDOA and FDOA can approach the theoretical lower bound.

Key words: geostationary satellite; low earth orbit satellite; time varying; TDOA; FDOA

1 引言

目前, 针对干扰辐射源的定位通常采用同步双星时频差定位方法^[1,2], 但受限于信号强度和基线长度, 定位精度不高。而高低轨双星定位是以低轨与同步卫

星组合, 形成双星时频差条件, 实现干扰源定位的技术, 它使得基线长度增加, 大大改善了定位几何, 具有很高的定位精度^[3]。故可利用同步双星定位的结果去引导低轨卫星接收干扰源信号, 构成高低轨双星的条件, 实现干扰源的精确定位。然而, 同步、低轨卫星间

相对干扰源的径向速度不仅差值大、而且变化快,即径向距离差和速度差随时间变化明显,导致时频差参数呈现时变特性,现有方法无法完成估计。目前,针对此问题的研究还少有文献提及,文献[4]针对雷达探测中具有加速运动的目标分析了加速度模糊函数及其相关性质,张南等人^[5]针对以电视伴音信号为照射源的外辐射源雷达探测问题,定义了时延-频移-时延率-调频率联合模糊函数。Weiss L. G^[6]则从宽带信号模型的角度分析了径向速度引起的多普勒尺度伸缩对信号包络的影响。文献[7]借鉴了相干积累的思想,通过时域分段相关处理,弱化了宽带模型下恒定径向速度对信号包络的影响。针对回波信号相位中存在的三次项问题,郭海燕等人^[8]提出了一种海杂波背景下的基于分数阶模糊函数线调频延时的运动弱目标检测方法。文献[9]则针对高速高机动弱小目标检测中的距离走动和多普勒走动问题,提出一种多普勒频率补偿加尺度变换的目标检测方法。但它们均不能很全面地描述和解决高低轨双星定位中的时变时频差参数估计问题。为此,本文通过分析同步、低轨卫星相对于干扰源的运动特性,建立了信号模型,定量分析了各运动参数对相关增益的影响,并在此基础上提出了基于运动补偿的时变时频差参数估计方法,仿真和试验结果表明了该方法的有效性和正确性。

2 干扰源高低轨双星定位原理

如图1所示为干扰源高低轨组合定位示意图,由于传播距离的不同,干扰信号到达两颗卫星时存在一个时间差;另外,两颗卫星的径向速度不同,使接收到的信号有着不同的多普勒频移,如式(1)、(2)所示:

$$TDOA = \frac{l_2 - l_1}{c} \quad (1)$$

$$FDOA = -\frac{f_u}{c} (\mathbf{v}_{s2} \cdot \mathbf{u}_2 - \mathbf{v}_{s1} \cdot \mathbf{u}_1) \quad (2)$$

其中, l_1 、 l_2 分别为干扰源到同步和低轨卫星的径向距离, \mathbf{v}_{s1} 、 \mathbf{v}_{s2} 为同步和低轨卫星的速度矢量, \mathbf{u}_1 、 \mathbf{u}_2 为同步和低轨卫星相对于干扰源的径向单位矢量, f_u 为信号中心频率, c 为光速。对于位置确定的同步和低轨卫星,由某一个时差值确定的轨迹是一个双曲面,与地球面可相交出一条时差线;与时差类似,频差测量的结果也可以在地球表面上画出一条频差线,两线交点就是干扰源的位置。

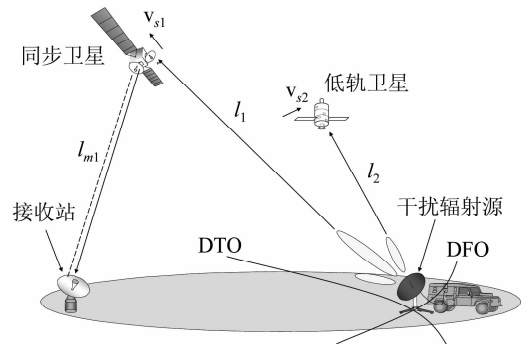


图1 高低轨组合双星定位系统示意图

Fig.1 sketch map of Geo Leo dual-satellites location system

3 信号模型及影响分析

3.1 运动模型

利用stk软件导入不同轨道参数的同步、低轨卫星,并在其共视区域随机生成干扰源的位置,通过分析统计近100组低轨、同步卫星和干扰源间的相对运动特性,发现在根据处理增益要求所确定的观测时间内,同步和低轨卫星与干扰源间的径向距离差随时间的变化均近似满足匀加速运动,且径向速度差、加速度差以及加加速度差的大小均在一定的范围内。下面列举典型场景进行说明:分别选取同步、低轨卫星,假定干扰源位置,根据星历计算两卫星相对于干扰源的径向速度差和加速度差变化情况,如图2所示:

可见,径向速度和加速度差均近似线性变化,说明径向距离差随时间的变化近似满足匀加速运动,并且加加速度的值很小。图3给出了该场景下同步、低轨卫星与共视区域内所有位置间的径向速度、加速度以及加加速度差大小的情况:

低轨卫星的瞬时覆盖范围有限,故无论干扰源在什么位置,同步、低轨卫星相对于它的径向速度差、加速度差和加加速度差的大小也是有限的,通过统计可得其大致范围。

综上所述,在高低轨双星定位条件下:

(1)同步、低轨卫星相对于干扰源的径向距离差随时间的变化在观测时间内近似满足匀加速运动模型;

(2)同步、低轨卫星相对于干扰源的径向速度差、加速度差和加加速度差大小均在一定范围内,统计得到:径向速度差 $v \in [-7\text{km/s}, 7\text{km/s}]$; 径向加速度差 $a \in [-80\text{m/s}^2, 0\text{m/s}^2]$; 径向加加速度差 $b \in [-1\text{m/s}^3, 1\text{m/s}^3]$ 。

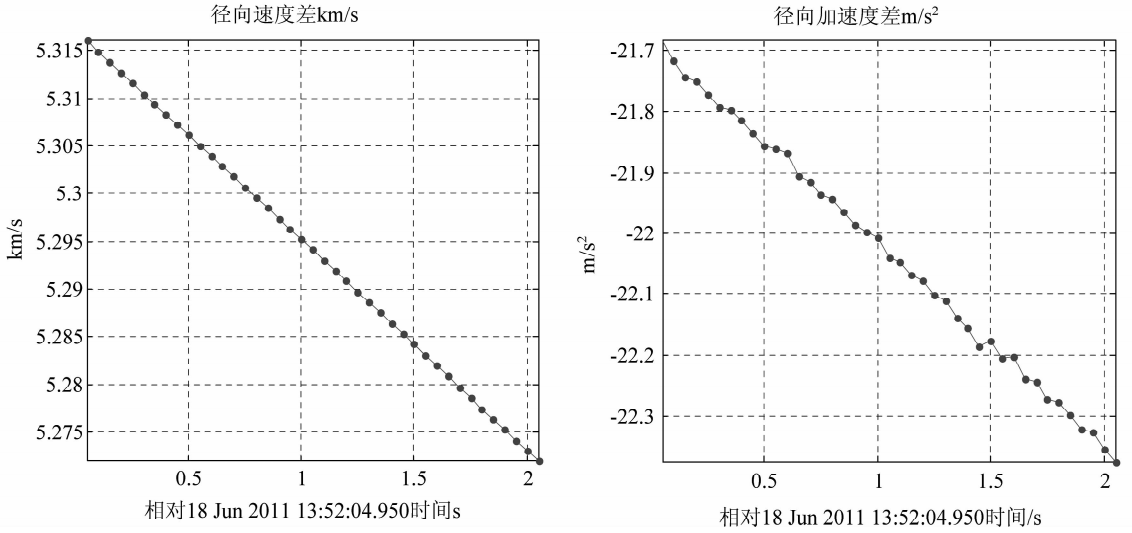


图 2 速度差、加速度差变化

Fig. 2 changing of velocity and acceleration differences

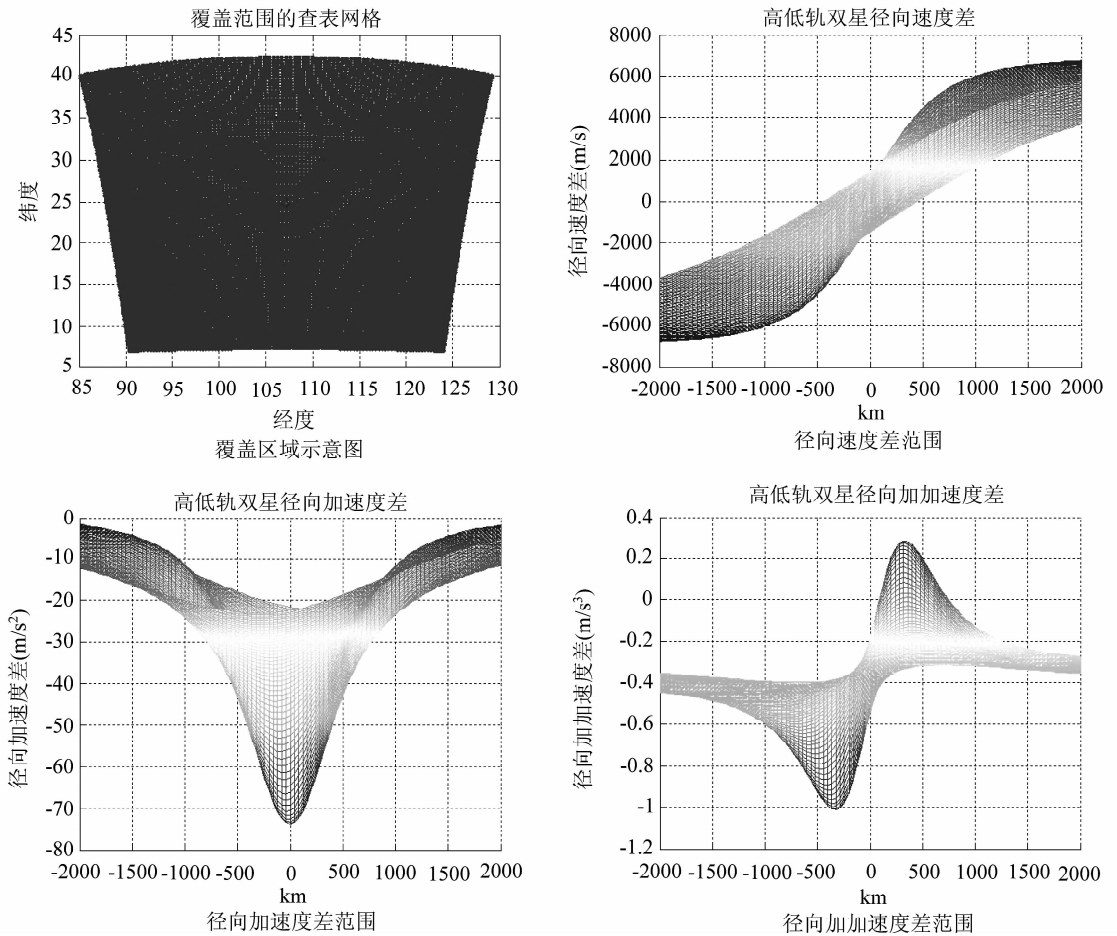


图 3 共视区域内运动参数的大小情况

Fig. 3 values of movement parameters in common-view zone

3.2 信号模型

由前可知,低轨、同步卫星与干扰源间的径向距离差近似满足匀加加速运动,则有:

$$R(t) = R + \nu t + \frac{1}{2}at^2 + \frac{1}{6}bt^3 \quad (3)$$

其中, R 表示初始距离差, ν 表示初始径向速度差, a 表示初始径向加速度差, b 表示加加速度差。若以同步卫星接收信号为基准,可等价理解为从静止的同步卫星向相对自己作匀加加速运动的,初始距离 R , 初始速度 ν , 初始加速度 a , 加加速度 b 的低轨卫星发射信号。设发射信号的时刻为 t_0 , 低轨卫星接收到信号的时刻为 t , 则两者满足下式:

$$t_0 + \frac{R(t)}{c} = t \Rightarrow c(t - t_0) = R(t) = R + \nu t + \frac{1}{2}at^2 + \frac{1}{6}bt^3 \quad (4)$$

求解上述方程可得:

$$t_0 = \frac{-R - (\nu - c)t - \frac{1}{2}at^2 - \frac{1}{6}bt^3}{c} \quad (5)$$

所以,若同步卫星接收到的信号为:

$$s_1(t) = m(t) \exp(j\omega_0 t) + n_1(t) \quad (6)$$

其中, $m(t)$ 是基带信号, ω_0 为信号频率, $n_1(t)$ 为加性高斯噪声, 则低轨卫星接收到的信号为:

$$s_2(t) = A_0 m \left(t - \frac{R + \nu t + \frac{1}{2}at^2 + \frac{1}{6}bt^3}{c} \right) \exp \left(j\omega_0 \left(t - \frac{R + \nu t + \frac{1}{2}at^2 + \frac{1}{6}bt^3}{c} \right) + j\omega_0 t \right) + n_2(t) \\ = A_0 m(t - \tau(t)) \exp(j2\pi f_d(t) + j\omega_0 t) + n_2(t) \quad (7)$$

式(7)中, A_0 是幅度因子, $n_2(t)$ 是加性高斯噪声, 显然, 时差 $\tau(t)$ 、频差 $f_d(t)$ 均为时变参数。通过(7)式可看出运动参数的影响主要有:

- (1) 径向速度、加速度和加加速度差引起的信号包络时间比例变化;
- (2) 径向速度差在载频部分引起的多普勒频移;
- (3) 径向加速度差在载频部分引起的多普勒调频率;
- (4) 径向加加速度差在载频部分引起的多普勒调频率的变化率。

3.3 运动参数的影响分析

通常利用互模糊函数(CAF)进行时频差定位参数的估计^[10], 而用可检测因子 D 描述相关计算后峰值与

噪底的比值关系, 其值越大, 表示估计越稳定可靠, 其表达式为:

$$D = \frac{2\gamma_1\gamma_2}{1+\gamma_1+\gamma_2} BT = BT\gamma \quad (8)$$

其中, γ_1, γ_2 是相关计算的两路信号的信噪比, $\gamma = 2\gamma_1\gamma_2/(1+\gamma_1+\gamma_2)$ 为等效信噪比, B 是信号带宽, T 是积累时间, BT 称为相关增益, 高低轨双星条件下, 相关增益要求通常不会超过 60dB。定义增益损失为通过式(8)计算的理論可检测因子与相关后实际的可检测因子大小之差。下面分别从信号包络和载频两部分讨论运动参数的影响。

运动参数对包络的影响, 本质是其引起的距离变化大于距离分辨单元, 积累的能量分散到多个距离单元, 通常称其为距离徙动, 即时差呈现时变特性。

(1) 径向加加速度差对的信号包络的时间比例变化影响;

根据 $(1/6)bt^3 \geq c/B$, 结合相关增益的要求, 由 3.1 可知径向加加速度差引起的距离变化不会导致时差时变, 可不予考虑。

(2) 径向加速度差造成的基带信号时间比例变化影响:

同理, 由 $(1/2)at^2 \geq c/B$ 可知高低轨双星条件下的加速度差引起的距离变化不足以跨越距离单元, 对信号包络的影响可忽略。

(3) 径向速度差引起的信号基带信号的时间比例发生变化

由 3.1 可知, 径向速度差可以达到 km/s 的量级, 根据 $VT \geq c/B$ 可知, 在积累时间 1 秒, 带宽 100kHz 时, 只要速度差大于 3km/s 就会出现跨距离单元的现象。故径向速度差导致的信号包络时间比例变化不能忽略, 并且 BT 较大时, 时差时变的问题较为严重, 增益损失很大。

类似于距离徙动, 多普勒徙动的程度, 即频差时变的程度, 决定了增益损失的大小, 表现为频差变化跨越多个频率分辨单元, 能量分散到多个频率单元了。

(4) 速度差在载频部分引起的多普勒频移
常说的多普勒频移, 对应着初始时刻的频差, 这里不作讨论。

(5) 加速度差在载频部分引起的多普勒调频率

加速度差会在接收信号载频上形成一个固定的线性调频率, 致使同步、低轨卫星接收号间的频差在积累时间内线性变化, 当变化大于频率分辨率, 即 $(a/2\lambda)T \geq 1/T$ 时, 增益出现损失。显然, 多普勒徙动的程度与频率、时间的平方成正比。

由于积累时间一般都为秒级,则频率分辨率基本都在 1Hz 以内,即使加速度差为 -10m/s^2 ,信号中心频率为 L 波段,其变化也远远超过了频率分辨率。并且加速度的值最大能到 80m/s^2 ,频率还可能更高,积累时间也可能更长,故其造成的多普勒徙动是非常明显的,会导致增益严重损失。

(6) 径向加加速度差在载频部分引起的多普勒调频率的变化率

径向加加速度差在接收信号的载频上引入了多普勒变化率的变化率,即相位的三次项。根据 $(1/6\lambda)bt^2 \geq 1/T$ 可知。当积累时间 2 秒,信号射频 1GHz 时,只要加加速度差大于 0.25m/s^3 就会发生多普勒徙动。故径向加加速度差对载频的影响同样必须考虑。

综上所述:

(1) 径向加速度差和加加速度差对信号包络的影响可以忽略;

(2) 径向速度差对信号包络及载频的影响必须考虑;

(3) 径向加速度差在载频部分引起的多普勒调频率必须考虑;

(4) 径向加加速度差在载频部分引起的多普勒调频率的变化率也需要考虑。

4 时变参数估计方法

根据前面的分析可知,要实现时变时频差参数的估计,必须对造成增益损失的运动参数进行补偿,主要包括了信号包络和载频两部分:

(1) 信号包络的径向速度差补偿

信号包络的影响主要由径向速度差引起,而其本质是时间比例的缩放,故补偿方法为以同样的比例因子对同步卫星信号进行缩放,即根据(5)式计算出补偿的径向速度差对应的低轨卫星接收信号的时间序列,对同步卫星数据在此时间序列处进行重采样,确保同步和低轨卫星具有相同的时间比例。检测时,速度补偿步进的大小可以根据 $VT \geq c/B$ 来确定,确保速度残差小于发生距离徙动的最小径向速度,积累的能量就在一个距离单元内。一旦检测到峰值,再根据参数估计精度的要求,确定较细的步进进行补偿。

(2) 信号载频的运动补偿

完成信号包络的径向速度差补偿后,同步与低轨卫星接收信号的差异还有:(1) 信号包络部分存在固定的时差;(2) 低轨卫星接收信号的载频上存在速度残差造成的多普勒频移、加速度差引起的线性调频率以及加加速度差引起的线性调频率的变化率三方面的

影响。

故信号模型可以简化为:

$$s_{1c}(t) = m(t) \exp(j\omega_0 t) + n_1(t)$$

$$s_{2c}(t) = A_0 m \left(t - \frac{R}{c} \right) \exp \left\{ j\omega_0 \left[- \frac{R + \nu' t + \frac{1}{2} a t^2 + \frac{1}{6} b t^3}{c} \right] + j\omega_0 t \right\} + n_2(t) \quad (9)$$

其中, ν' 是补偿后的速度残余量。

据此,定义距离-速度-加速度-加加速度模糊函数:

$$A(\tau, f, a, \beta) = \int_{-\infty}^{\infty} s_1(t) \cdot s_2^*(t + \tau) e^{j2\pi \left(ft + \frac{1}{2} a t^2 + \frac{1}{6} \beta t^3 \right)} dt \quad (10)$$

从式(10)可以看到,距离-速度-加速度-加加速度模糊函数是包含四个自变量的四维空间体函数,其物理意义为时差为 τ , 频差为 f , 径向加速度差 a , 加加速度差为 β 的目标模糊程度。显然,上述模糊函数的最大值对应着各参数的估计值:

$$(\hat{\tau}_0, \hat{f}_d, \hat{a}, \hat{\beta}) = \arg \max_{\tau, f, a, \beta} |A(\tau, f, a, \beta)| \quad (11)$$

通过(10)式可以看出,距离-速度-加速度-加加速度模糊函数的本质为准确补偿低轨卫星载频上的加速度差和加加速度差后,再通过传统的时频二维互模糊函数计算估计时频差值。(需注意的是式(10)中的多普勒频移是补偿后的径向速度差残量引起的。即 $f_d = -2\pi f_0 \frac{\nu - \nu_c}{c}$, 其中, ν_c 是基带包络信号运动补偿时使用的速度)。综上所述,基于传统时频二维互模糊函数的实现流程,得到时变时频差参数的估计流程如下所示:

(1) 根据信号带宽和积累时间,选择相应的步进大小对同步卫星信号包络进行径向速度差的补偿;

(2) 对完成了径向速度差补偿的同步卫星信号的载频部分进行径向加速度差和加加速度差的补偿;

(3) 将运动补偿后的同步卫星信号和低轨卫星信号进行传统的时频二维互模糊计算;

(4) 找出最大值,在其时差、频差域切面上进行插值,估计出时频差定位参数。

需注意的是上述时变时频差参数估计方法中运动参数补偿步进大小的选择应遵循先检测后估计的原则,即先用较粗的步进补偿,保证检测到峰值即可,其次再在峰值对应的运动参数附近以更精细的步进补

偿,完成精确地估计。

5 仿真试验结果

5.1 运动参数的影响仿真

选取同步和低轨卫星,假设干扰源的位置,根据两卫星与干扰源间径向距离差变化仿真产生存在时变时

频差的高低轨数据,加上高斯噪声,信号频率 $f_0 = 1.6$ GHz,信号带宽 200kHz,积累时间 2.5s。依次进行如下处理:(1)现有方法进行互模糊函数计算;(2)补偿加速度,计算互模糊;(3)再补偿速度,计算互模糊;(4)最后补偿加加速度,完成互模糊函数计算,得到如下处理结果:

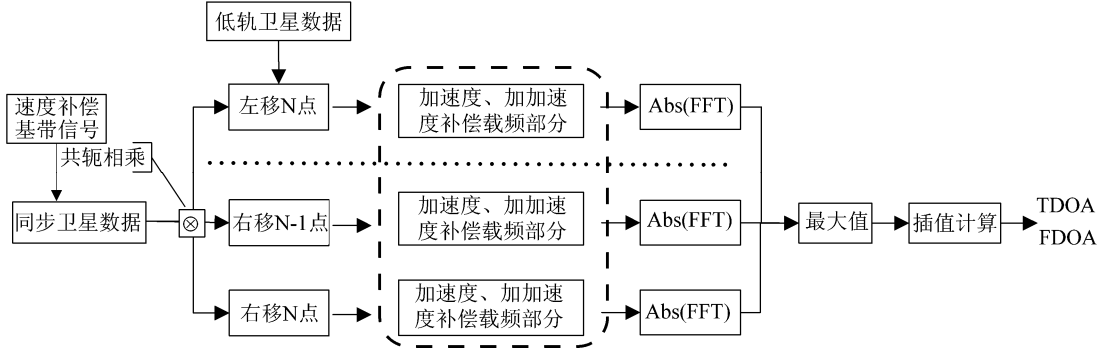


图4 算法流程图

Fig. 4 flow chart of algorithm

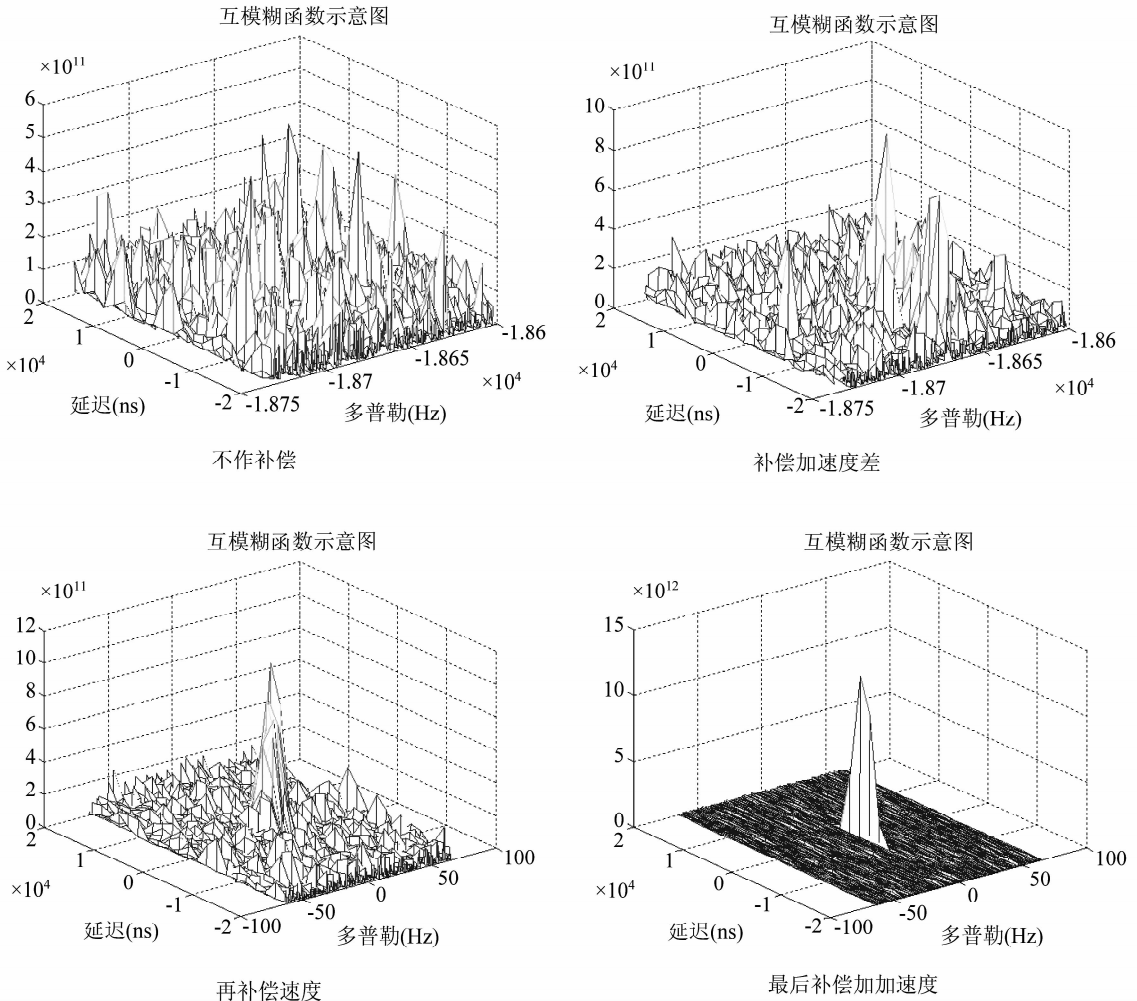


图5 不同补偿条件下的模糊函数

Fig. 5 the results of CAF on different compensate conditions

可见,不作运动补偿,直接计算互模糊函数时,无法检测到峰值;补偿径向加速度差后,出现一个畸变的相关峰,其时差轴上的明显展宽是因为径向速度引起的距离徙动;然后再补偿径向速度差,呈现出较为明显的相关峰,但能量在多普勒域上还存在一定的扩展现象;最后再补偿加加速度差,相关峰变得完整,可检测因子提高。通过四副图的对比,直观地反映出运动参数对相关增益的影响,也验证了前面运动参数影响分析的结论。

5.2 参数估计精度仿真

同步卫星作为主瓣接收,信号信噪比往往较高,假设为 10dB,而低轨卫星处于干扰源远旁瓣时,信噪比较低,考虑 -40dB 到 -30dB 的情况,其他仿真条件不变,利用本文方法完成估计。运动参数的补偿步进分别为 1m/s , 0.5m/s^2 和 0.01m/s^3 ,进行 100 次蒙特卡洛仿真,统计得到可检测因子(均值)和时频差估计精度(误差标准差)随着低轨卫星信噪比的变化曲线,并分别与理论值和估计精度下界进行比较,得到如下结果:

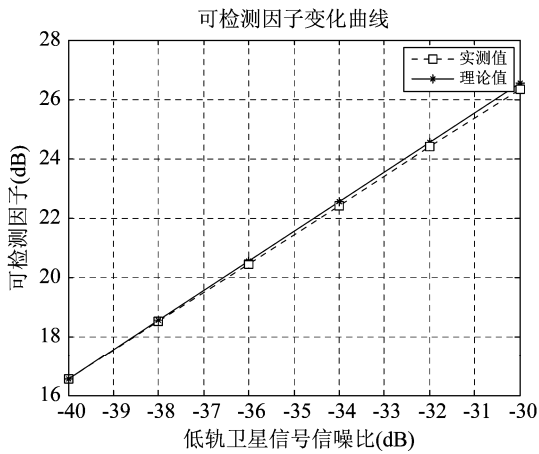


图 6 可检测因子曲线
Fig. 6 curve of values of detected factor

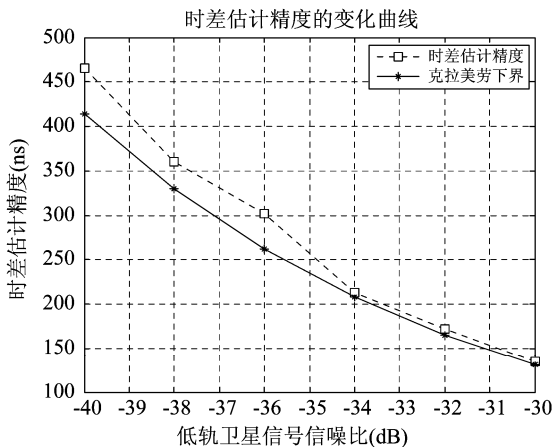


图 7 时差估计精度曲线
Fig. 7 estimation accuracy of TDOA

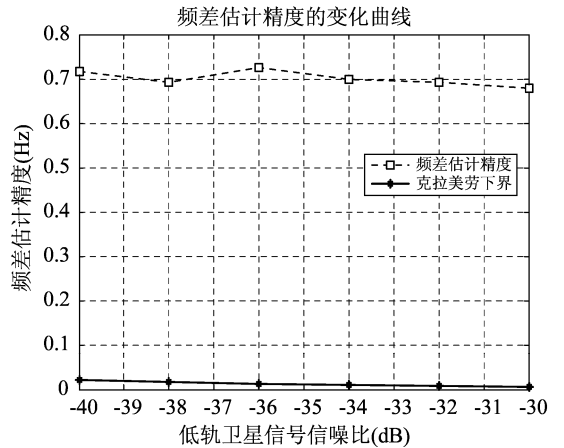


图 8 频差估计精度曲线
Fig. 8 estimation accuracy of FDOA

通过可检测因子的实测值与理论值的对比可知,有效消除了低轨卫星高速运动带来的相关增益损失,时差估计精度接近理论下界,但频差估计精度离理论下界有一定差距,这是因为此时的频差估计精度主要由加速度和加加速度差的补偿步进决定。进一步缩小其步进大小,重新计算得到如图 9 所示结果。

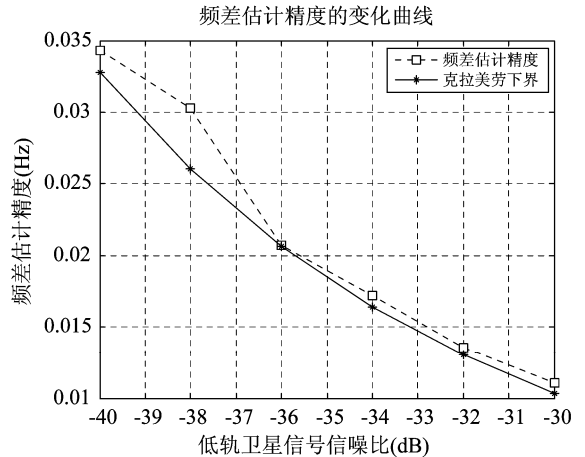


图 9 缩小步进大小后的频差估计精度曲线
Fig. 9 estimation accuracy of FDOA after minishing the step sizes

可见,缩小了补偿步进后,频差的估计精度接近了理论下界。这说明步进足够精细时,利用本文方法对时变时频差参数估计精度能够与固定时频差的精度相当,逼近理论下界,也进一步说明了运动参数的补偿步进应采用先粗后细的方式,在保证精度的同时不增加过多的运算量。

5.3 试验结果

本文利用某气象卫星的测控信号进行了试验验证:测控信号为带宽 200kHz 的 QPSK 信号,在测控站发射信号的同时,利用对数周期天线接收该测控信号,

并进行同步采集后,模拟替代同步卫星的接收信号。将两信号汇总后,利用本文的时变时频差参数估计方法进行了处理。

分别利用0.1、0.5、1、2和4秒长度的数据进行处理,统计经过运动补偿前后的可检测因子,得到下表:

从表中可以看出,即使0.1秒的数据,运动参数已经造成了增益的损失;积累时间达到0.5秒时,增益损失更加明显了;积累时间进一步增加到1、2和4秒后,

不经过运动补偿,能量就无法积累了。另外,当积累时间达到4秒时,即使做了运动补偿,相比2秒的情况,其可检测因子不升反降。说明积累时间过长时,再以匀加速运动模型进行近似,会出现偏差,距离和多普勒徙动不能完全消除,导致了增益的损失。

下面再对处理2秒的数据,通过互模糊函数的结果来分析各运动参数的影响:

(1) 不补偿径向速度差时:

表1 不同积累时间的运动补偿前后的可检测因子

Tab.1 the values of detected factor before and after movement compensating on different accumulate time conditions

积累时间(s)	0.1	0.5	1	2	4
未补偿时可检测因子(dB)	15.801	13.1159	12.1609	无峰值	无峰值
运动补偿后可检测因子(dB)	18.767	25.1150	29.0012	31.6002	28.139

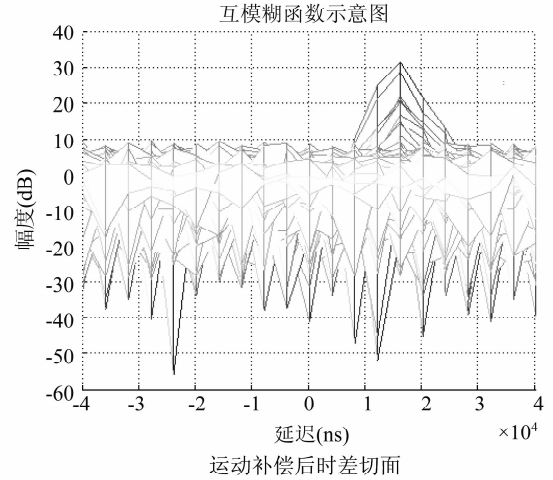
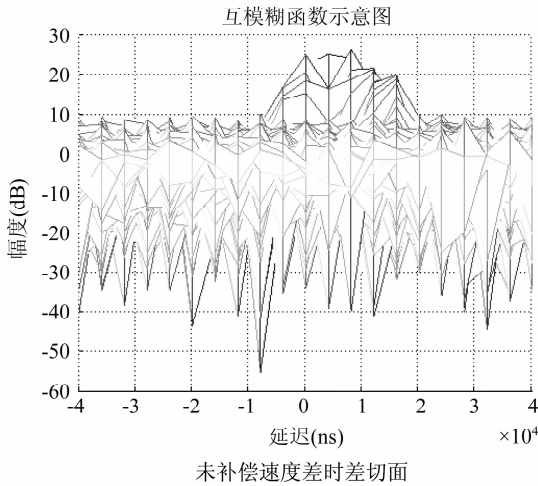


图10 速度补偿前后的互模糊函数结果

Fig.10 the results of CAF before and after velocity difference compensating

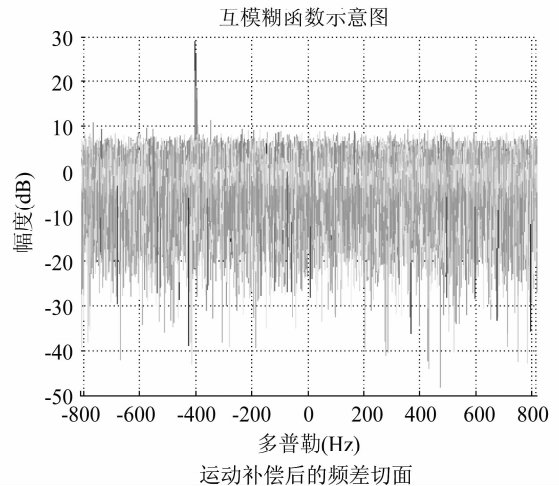
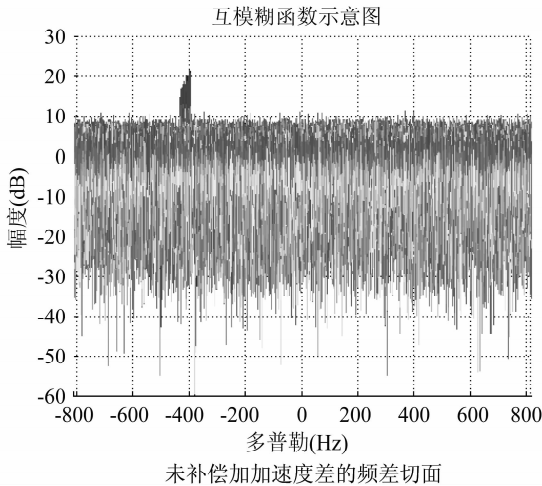


图11 加加速度补偿前后的互模糊函数结果

Fig.11 the results of CAF before and after Jerk difference compensating

表 2 不同补偿条件下的可检测因子大小

Tab. 2 the values of detected factor before on different compensate conditions

运动参数补偿条件	完全补偿	不补偿速度差	不补偿加加速度差	不补偿加速度差
可检测因子 (dB)	31.6002	26.3790	21.1012	无峰值

根据 $V=c/(BT)$ 得出发生距离徙动的最小径向速度差为 750m/s , 而选取时刻对应的径向速度在 3km/s 左右, 故会导致增益损失。对比图 10 中的两幅图可以看出, 未经速度差补偿时, 距离徙动导致相关峰的时差切面出现了畸变, 增益也就出现了损失。

(2) 未补偿径向加加速度差时:

对比图 11 中的两幅图可以看出, 未经加加速度差补偿时, 相关峰的频差切面出现了展宽的现象, 积累的能量被分散到了多个频率单元, 相关增益损失明显。

(3) 未补偿径向加速度差时:

不补偿径向加速度差时, 相关增益几乎完全损失, 检测不到峰值。

表 2 给出了上述几种不同运动参数补偿条件下的可检测因子情况:

可见, 多普勒徙动是增益损失的主要因素, 其中径向加速度差的影响又最为显著。通过对比也可以看出试验与仿真结果基本吻合, 进一步验证了本文方法的有效性和正确性。

6 结束语

本文通过综合分析卫星干扰源高低轨双星定位的应用场景, 结合大量轨道数据完成了同步、低轨卫星与干扰源间径向方向的相对运动特性分析和信号模型的建立, 给出了影响时变参数估计的主要因素, 并在此基础上提出了基于运动补偿的时变时频差参数估计方法, 通过仿真和试验验证了其有效性。该方法以运动参数的补偿为基础, 利用同步双星定位结果引导时, 掌握了干扰源的大致区域, 因此能够计算出运动参数的大致范围, 同时该方法涉及并行计算, 利用 GPU、FPGA 等进行算法实现将有利于提高时效性, 故具备一定的工程实用价值。但若没有任何先验信息, 需要高低轨双星体制独立完成定位时, 涉及运动参数搜索, 运算量巨大, 时效性较差。故如何通过信号处理的方式获取运动参数, 完成补偿, 实现时频差定位参数的估计, 有待进一步研究

解决。

参考文献

- [1] 孙正波, 叶尚福. 一种时差/频差快速联合估计方法 [J]. 电波科学学报, 2006, 21(5): 641-646.
Sun Z. B., Ye S. F. Fast algorithm for joint estimation of DTO and DFO [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2006, 21(5): 641-646. (in Chinese)
- [2] Smith W. W., Steffes P. G. A satellite interference location system using differential time and phase measurement techniques [J]. IEEE Aerospace and Electronics Systems Magazine, 1991, 6(3): 3-7.
- [3] 郑晋军, 曹志刚. 低轨卫星辅助的干扰源位置确定 [J], 系统工程与电子技术, 2005, 27(12): 2002-2005.
Zheng J. J., Cao Z. G., LEO satellite aided positioning of interference source [J]. Systems Engineering and Electronics. 2005, 27(12): 2002-2005. (in Chinese)
- [4] 赵宏钟, 付强, 周剑雄. 雷达信号的加速度分辨率分析及应用 [J]. 电子学报, 2003, 31(6): 958-961.
Zhao H. Z., Fu Q., Zhou J. X. The Analysis of Acceleration Resolution and Application for the Radar Signal [J]. Acta Electronica Sinic, 2003, 31(6): 958-961. (in Chinese)
- [5] 张南, 陶然, 单涛, 王越. 外辐射源雷达长时间积累目标探测性能分析 [J]. 电子学报, 2008, 36(6): 1103-1107.
Zhang N., Tao R., Shan T., Wang Y. Performance Analysis of Target Detection Using Long-Term Integration in External Illuminating Radar [J]. Acta Electronica Sinic, 2008, 36(6): 1103-1107. (in Chinese)
- [6] Weiss L. G. Wavelets and Wideband Correlation Processing [J]. IEEE Signal Processing Magazine 1994, 11(1): 13-32.
- [7] Ulman R., Geraniotis E. Wideband TDOA-FDOA Processing using summation of short time CAFs [J]. IEEE Transactions on Signal Processing. 1999, 47(12): 3193 ~ 3200.
- [8] 郭海燕, 关键. 基于分数阶模糊函数线调频率延时对消的运动弱目标检测 [J]. 信号处理, 2011, 27(5):

760-764.

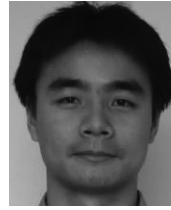
Guo H. Y. , Guan J. Weak Target Detection Based on LFM-delay Fractional Ambiguity in Sea Clutter[J]. Signal Processing, 2011, 27(5) :760-764. (in Chinese)

- [9] 李志淮, 谭贤四, 王红, 潘新龙. 高速高机动弱小目标检测方法研究[J]. 信号处理, 2011, 27(6) :906-911.

Li Z. H. , Tan X. S. , Wang H. , Pan X. L. Detection algorithm for high speed and high maneuvering weak targets [J]. Signal Processing, 2011, 27(6) :906-911. (in Chinese)

- [10] Stein S. Algorithms for ambiguity function processing[J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing, 1981, 29(3) :588-599.

作者简介



杨宇翔(1984-),男,生于重庆。西南电子电信技术研究所博士研究生、主要研究方向为信号处理、目标检测定位。

E-mail:yyxforever@163.com

夏畅雄(1979-),男,生于湖南沅江。西南电子电信技术研究所博士、高级工程师、主要研究方向为无源定位。

E-mail:xiaxiong@sohu.com

同武勤(1979-),男,生于陕西韩城。电子工程学院博士、西南电子电信技术研究所工程师、主要研究方向为信号处理、外辐射源定位。E-mail:1214285255@qq.com