

文章编号: 2095-4980(2016)04-0525-06

多星对地定位测速的合作与非合作模型对比

石 荣, 张 伟, 刘 畅

(电子信息控制重点实验室, 四川 成都 610036)

摘 要: 针对多星对地定位测速的应用问题, 首先分析了星载电子侦察定位与卫星导航定位在数学模型上的本质联系, 然后在卫星导航的合作式测速模型的基础上, 推导得出多颗电子侦察卫星对辐射源目标进行非合作测速的模型, 并进一步讨论了在三星条件下的非合作测速问题的求解。仿真结果表明: 在2 Hz频差测量精确度下, 测速精确度可达5 m/s量级。从而为电子侦察卫星对运动辐射源目标的测速应用提供了参考。

关键词: 多星对地定位; 多星对地测速; 合作模型; 非合作模型; 时差定位; 频差测速; 全球卫星导航系统; 卫星电子侦察

中图分类号: TN971; TN961

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201604.0525

Contrastive analysis on cooperation and non-cooperation models for location and velocity measurement by multiple satellites to earth objects

SHI Rong, ZHANG Wei, LIU Chang

(Science and Technology on Electronic Information Control Laboratory, Chengdu Sichuan 610036, China)

Abstract: The application of location and velocity measurement by multiple satellites to earth objects is very important. The intrinsic relationship for location model between satellite electronic reconnaissance and Global Navigation Satellite System(GNSS) is firstly analyzed. The non-cooperation velocity measurement model for radiation objects through the multiple electronic reconnaissance satellites is naturally established based on the GNSS principle. Then the instance is further discussed when the number of satellite decreases to three. The simulations demonstrate that the velocity precision about 5 m/s is acquired on condition of frequency difference of 2 Hz. This is an important reference for radiation object velocity measurement application by the electronic reconnaissance satellites.

Key words: location by multiple satellites to earth object; velocity measurement by multiple satellites to earth object; cooperation model; non-cooperation model; location based on Time Difference of Arrival (TDOA); velocity measurement based on Frequency Difference of Arrival(FDOA); Global Navigation Satellite System; satellite electronic reconnaissance

通过多颗卫星对地表目标进行定位可分为2种:合作方式与非合作方式。合作方式主要应用于卫星导航,导航星座中多颗卫星通过对地发射经过特殊设计的导航信号,在地面目标上搭载的导航接收机同时接收这些信号之后,通过多星伪距测量来实现目标自身位置的解算^[1-2]。由于在此过程中,导航卫星与定位接收机之间是相互配合工作的,即发射信号中承载的信息(如调制方式、编码类型、数据帧格式和导航电文等)对于收发双方来说都是约定已知的,所以称之为合作方式。而通过电子侦察卫星对地面辐射源目标实施无源定位来获得目标位置则是非合作方式中的典型代表,因为在这一过程中,辐射源目标发射信号的形式、所包含的内容、信号发射的时刻等信息对于电子侦察卫星来说都是未知的,需要电子侦察卫星自己对信号进行截获与处理之后才能提取出信号中含有的信息,所以称之为非合作方式^[3-4]。在卫星电子侦察对地定位体制中,多星时差对地无源定位具有适用范围广,定位精确度高等优点而受到世界各国的普遍重视,并且也得到了实际应用,这以美国的“白云”海洋监视卫星为典型代表,所以在本文中主要针对电子侦察中多星定位方面的应用进行分析。

收稿日期: 2015-06-03; 修回日期: 2015-07-21

基金项目: 总装备部共性技术基金资助项目(9140A21XX01XXDZX90X6)

目前在国内外的各类技术文献中对上述2种多星对地定位方式都开展了大量的研究,在非合作定位方面已经提出过四星时差(Time Difference of Arrival, TDOA)对地无源定位,三星时差 TDOA 对地无源定位,双星时差 TDOA/频差(Frequency Difference of Arrival, FDOA)对地静止目标的无源定位,以及单星仅测频对地面静止目标的无源定位等各种非合作定位方法^[5-13]。但是对于多星对地面目标的测速应用,只有在卫星导航中有合作式的测速模型,在非合作方式下利用多颗电子侦察卫星对辐射源目标的三维运动速度的测量未见报道。针对上述情况,本文首先从卫星导航中的合作定位模型出发,推导得出了卫星电子侦察中非合作的多星 TDOA 时差定位模型,在揭示出2类定位模型之间本质联系的基础上,通过卫星导航中的合作式测速模型,自然推导得到了多颗电子侦察卫星对辐射源目标进行非合作测速的模型,并对在不同卫星数目条件下的非合作测速问题进行了讨论与分析。于是在多星对地电子侦察应用中,不仅可获得辐射源目标的位置信息,而且可获得辐射源目标的速度信息。

1 卫星电子侦察定位与卫星导航定位之间的联系

不失一般性,为了方便问题的讨论与求解,建立地面目标区域附近的测站坐标系,如采用其他坐标系,在经过坐标转换之后问题的本质不变^[11]。该坐标系中,在所关注的时刻点上,地面目标的位置坐标为 (x_T, y_T, z_T) , M 颗导航卫星的位置坐标分别为 $(x_{N,i}, y_{N,i}, z_{N,i})$, $i=1, 2, \dots, M$, 目标上的导航接收机测量得到的目标与各颗导航卫星之间的伪距分别为 $d_{N,i}$, 于是可以建立如下的全球卫星导航系统(GNSS)的导航定位方程:

$$\sqrt{(x_T - x_{N,i})^2 + (y_T - y_{N,i})^2 + (z_T - z_{N,i})^2} = d_{N,i} + \Delta T \cdot c \quad (1)$$

式中: ΔT 为接收机与导航卫星之间的时钟偏差; c 为电磁波的传播速度。式(1)中待求解的4个未知数分别为 ΔT 与 (x_T, y_T, z_T) , 所以一般情况下要求 $M \geq 4$ 才能实现式(1)的求解,其所体现的物理意义就是通常在 GNSS 中反复强调的:至少需要4颗导航卫星才能实现导航定位。

如果将上述导航卫星全部更换为电子侦察卫星,即此时 M 颗电子侦察卫星的位置与 M 颗导航卫星的位置完全相同,并且该被定位的目标平台上也携带有1个电磁辐射源向空间辐射信号,这 M 颗电子侦察卫星对该辐射源发射的信号进行侦察截获与时差 TDOA 测量,可得到 $M-1$ 个时差测量值分别为 $\tau_{E,j}$, $j=1, 2, \dots, M-1$, 于是可以建立如下的时差无源定位方程:

$$\sqrt{(x_T - x_{N,j})^2 + (y_T - y_{N,j})^2 + (z_T - z_{N,j})^2} - \sqrt{(x_T - x_{N,M})^2 + (y_T - y_{N,M})^2 + (z_T - z_{N,M})^2} = \tau_{E,j} \cdot c \quad (2)$$

对比式(2)与式(1)可发现,如果将式(1)中的前 $M-1$ 个方程与第 M 个方程相减,消除变量 ΔT 之后,在式(3)条件下可以推导出式(2)的 $M-1$ 个方程,且有:

$$d_{N,i} - d_{N,M} = \tau_{E,j} \cdot c, \quad i=j \quad (3)$$

式(3)所表达的物理意义在于:卫星导航定位中的伪距差实际上等于信号到达时间之差与电磁波传播速度的乘积,这与实际情况是完全吻合的。由此可见,可以从合作式卫星导航定位方程式(1)推导出非合作式多星电子侦察对地时差无源定位方程式(2)。在实际情况中,电磁波在2种定位应用中的传播方向刚好相反。在卫星导航定位中携带有信息的电磁波信号是从导航卫星向被定位的导航接收机进行传输的;而在卫星电子侦察的时差定位中携带有信息的电磁波信号是从被定位的目标辐射源向电子侦察卫星进行传输的。虽然电磁波传播方向不同,但是二者的定位数学方程在本质上是相通的。

2 卫星导航应用中合作式测速模型

导航接收机在接收到各颗导航卫星发来的导航电文之后,可以准确计算出某时刻 M 颗导航卫星的运动速度分别为 $(v_{Nx,i}, v_{Ny,i}, v_{Nz,i})$, $i=1, 2, \dots, M$, 而需要测量的导航接收机的运动速度为 (v_{Tx}, v_{Ty}, v_{Tz}) , 此时导航接收机测量得到相对于各颗导航卫星的多普勒频移分别是 δf_i , 于是可以建立如下的 GNSS 三维测速方程:

$$(v_{Nx,i} - v_{Tx}) \cos \theta_{xi} + (v_{Ny,i} - v_{Ty}) \cos \theta_{yi} + (v_{Nz,i} - v_{Tz}) \cos \theta_{zi} = (\delta f_i + \Delta F) \lambda \quad (4)$$

式中: ΔF 为接收机与导航卫星之间的参考频率偏差; λ 为信号波长; θ_{xi} , θ_{yi} 和 θ_{zi} 分别表示第 i 颗卫星与目标之间的连线相对于3个坐标轴的方位余弦角,在完成目标定位之后上述角度都可以由式(5)计算:

$$\begin{cases} \cos \theta_{xi} = (x_{N,i} - x_T) / R_{Ni,T} \\ \cos \theta_{yi} = (y_{N,i} - y_T) / R_{Ni,T} \\ \cos \theta_{zi} = (z_{N,i} - z_T) / R_{Ni,T} \\ R_{Ni,T} = \sqrt{(x_{N,i} - x_T)^2 + (y_{N,i} - y_T)^2 + (z_{N,i} - z_T)^2} \end{cases} \quad (5)$$

由上可知,在式(4)中待求解的未知数仍然是4个: ΔF 与 (v_{Tx}, v_{Ty}, v_{Tz}) ,所以一般情况下要求 $M \geq 4$ 才能对式(4)进行求解,其所体现的物理意义为:至少需要4颗导航卫星才能实现被定位目标的三维运动速度的测量。在合作式卫星导航应用中,导航接收机不仅可以获得所在运动平台的三维运动速度信息 (v_{Tx}, v_{Ty}, v_{Tz}) ,而且可以获得接收机工作频率与整个导航卫星星座频率之间的相对差值 ΔF 。结合上一节的分析结果,导航接收机能够获得接收机工作时钟与整个导航卫星星座时钟之间的相对差值 ΔT ,所以在卫星导航应用中,不仅可以实现目标的定位与测速,而且可以实现授时与统频。关于对导航定位与测速方程(1)与方程(4)的求解方法与步骤在许多文献中都有详细的讲解^[1],在此不再重复展开讨论。

3 通过多星频差测量进行非合作测速

3.1 多星条件下的目标测速模型

前面在目标定位的合作与非合作模型对比分析过程中,选择其中1个伪距测量方程作为参考式,通过伪距求差方式,从卫星导航的合作式定位模型推导得到了卫星电子侦察中非合作时差无源定位模型。采用同样的思路与方法,如果将上述导航卫星更换为电子侦察卫星,即 M 颗电子侦察卫星的坐标位置与轨道参数均与 M 颗导航卫星完全相同,并且该被定位的目标也携带有1个电磁辐射源,于是这 M 颗电子侦察卫星对该辐射源发射的信号进行频差测量,得到 $M-1$ 个频差测量值分别为 $\gamma_{E,j}$, $j=1,2,\dots,M-1$,于是可以建立如下的频差测速方程:

$$\begin{aligned} & \left[(v_{Nx,j} - v_{Tx}) \cos \theta_{xj} + (v_{Ny,j} - v_{Ty}) \cos \theta_{yj} + (v_{Nz,j} - v_{Tz}) \cos \theta_{zj} \right] - \\ & \left[(v_{Nx,M} - v_{Tx}) \cos \theta_{xM} + (v_{Ny,M} - v_{Ty}) \cos \theta_{yM} + (v_{Nz,M} - v_{Tz}) \cos \theta_{zM} \right] = \gamma_{E,j} \cdot \lambda \end{aligned} \quad (6)$$

对比式(6)与式(4)可发现,将式(4)中的前 $M-1$ 个方程与第 M 个方程相减,消除参考频率偏差变量 ΔF 之后,在式(7)所示条件下可以推导出式(6)的 $M-1$ 个方程,且有:

$$\delta f_i - \delta f_M = \gamma_{E,j}, \quad i=j \quad (7)$$

式(7)所表达的物理意义在于:卫星导航测速中的多普勒频率之差实际上就反映了各颗卫星运动所带来的被测信号频率之差,这与实际情况也是完全吻合的。由此可见,可以从合作式卫星导航三维测速方程推导出非合作式多星电子侦察测速的频差测速方程。通过式(6)所示的频差方程,在已经获得辐射源目标位置的条件下,可由至少4颗电子侦察卫星对辐射源目标所发射的信号进行频差测量之后,来解算得到该目标的三维运动速度。

综上所述,以上分析结果意味着:一般情况下,至少利用4颗电子侦察卫星不仅可以通过TDOA时差测量来实现对辐射源目标的无源定位,而且还可以通过FDOA频差测量来获得辐射源目标的三维运动速度,这为辐射源目标的定位、识别与跟踪等应用提供了良好的条件。

3.2 三星条件下的辐射源目标测速问题讨论

如前所述,采用多颗电子侦察卫星对辐射源目标实施无源定位与三维测速过程中,卫星数目至少需要4颗。如果将卫星的数目减少至3颗,但仍要求实施无源定位与测速,那么只有在附加边界约束条件下才能获得定位方程(2)与测速方程(6)的解。而常见的边界约束条件是已知辐射源目标的高度值,特别是针对海面舰艇上的辐射源,或者是平整陆地表面上运动车辆上的辐射源来说,这一假设是基本合理的。因为海面舰艇上的辐射源(如舰载雷达、舰载通信终端等)高度一般在几十米至一百米范围,当舰艇在海面上运动时其高度不会发生大的变化;而地面车辆上的辐射源(如车载通信终端等),其高度与所在位置处的海拔高度接近。这样一来,目标位置坐标 (x_T, y_T, z_T) 中的未知参数只有 (x_T, y_T) ,而 z_T 假设为已知;在短暂的观测时间内同时假设目标的高度保持恒定,于是待求解的目标运动速度参数也只有 (v_{Tx}, v_{Ty}) ,而 $v_{Tz}=0$ 。在此条件下,通过3颗电子侦察卫星可由式(2)得到2个TDOA时差测量方程如下,从而可以求解出目标的位置坐标为 (x_T, y_T) 。

$$\begin{cases} \sqrt{(x_T - x_{N,1})^2 + (y_T - y_{N,1})^2 + (z_T - z_{N,1})^2} - \sqrt{(x_T - x_{N,3})^2 + (y_T - y_{N,3})^2 + (z_T - z_{N,3})^2} = \tau_{E,1} \cdot c \\ \sqrt{(x_T - x_{N,2})^2 + (y_T - y_{N,2})^2 + (z_T - z_{N,2})^2} - \sqrt{(x_T - x_{N,3})^2 + (y_T - y_{N,3})^2 + (z_T - z_{N,3})^2} = \tau_{E,2} \cdot c \end{cases} \quad (8)$$

然后在此基础上, 通过 3 颗电子侦察卫星再由式(6)得到 2 个 FDOA 频差测量方程如下, 从而可以求解出目标的运动速度为 (v_{Tx}, v_{Ty}) 。

$$\begin{cases} \left[\left[(v_{Nx,1} - v_{Tx}) \cos \theta_{x1} + (v_{Ny,1} - v_{Ty}) \cos \theta_{y1} + v_{Nz,1} \cos \theta_{z1} \right] - \right. \\ \left. \left[(v_{Nx,3} - v_{Tx}) \cos \theta_{x3} + (v_{Ny,3} - v_{Ty}) \cos \theta_{y3} + v_{Nz,3} \cos \theta_{z3} \right] \right] = \gamma_{E,1} \cdot \lambda \\ \left[\left[(v_{Nx,2} - v_{Tx}) \cos \theta_{x2} + (v_{Ny,2} - v_{Ty}) \cos \theta_{y2} + v_{Nz,2} \cos \theta_{z2} \right] - \right. \\ \left. \left[(v_{Nx,3} - v_{Tx}) \cos \theta_{x3} + (v_{Ny,3} - v_{Ty}) \cos \theta_{y3} + v_{Nz,3} \cos \theta_{z3} \right] \right] = \gamma_{E,2} \cdot \lambda \end{cases} \quad (9)$$

由此可见, 通过增加“辐射源目标高度已知, 且在观测时段内保持恒定”这一约束条件, 采用 3 颗电子侦察卫星同样可以实现对辐射源目标的无源定位与非合作速度测量。

4 仿真校验

仿真条件: 不失一般性, 为了简化计算, 以被定位的目标为坐标系原点, 建立本地测站直角坐标系, 在该坐标系中 4 颗卫星的位置分别为: (4 818, 20 878, 15 122)km, (-17 549, -16 289, 10 947)km, (-3 325, 19 950, 16 637)km 和 (17 592, -14 807, 12 732)km。在此位置处 4 颗卫星的运动速度分别为: (1.997 1, 1.416 8, -2.629 3)km/s, (-0.648 8, 2.370 5, 3.054 8)km/s, (2.048 9, -1.676 2, 2.419 4)km/s 和 (-0.425 5, -2.568 1, -2.896 2)km/s。下面分别针对 3 种情况进行仿真。

1) 4 颗导航卫星对机载目标合作定位与测速

在此应用场景中, 设机载目标的运动速度为(183, 172, 150)m/s, 导航接收机的伪距测量精确度为 1 m(r.m.s), 频率测量精确度为 2 Hz(r.m.s), 导航接收机与导航卫星之间的初始时钟偏差为 1 μ s, 导航接收机与导航卫星之间的参考频率偏差为 50 Hz, 导航信号的频点为 1 575.42 MHz。采用迭代法对前面给出的导航定位方程式(1)进行求解, 然后利用式(1)的结果对测速方程式(4)进行直接求解。通过 100 次蒙特卡罗仿真, 所得的定位误差曲线和测速误差曲线见图 1 和图 2。

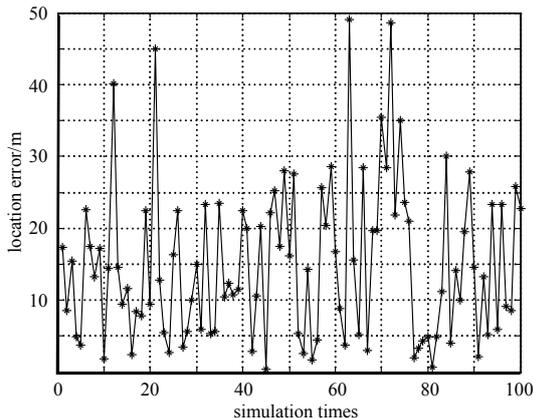


Fig.1 Location error for 4 GNSS satellites simulation
图1 四星导航定位误差仿真曲线

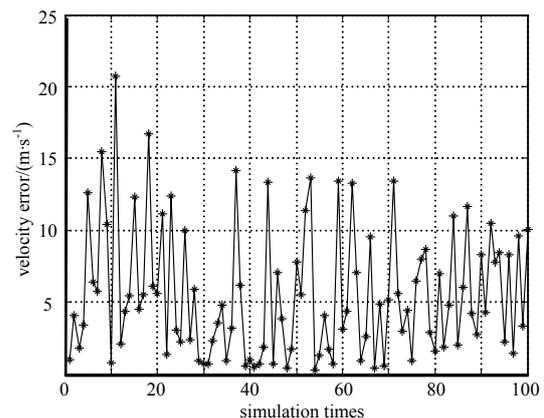


Fig.2 Velocity error for 4 GNSS satellites simulation
图2 四星导航测速误差仿真曲线

由上图可见, 4 颗导航卫星定位与测速仿真试验中, 100 次仿真的定位误差平均值为 15 m, 速度误差平均值为 5.54 m/s。

2) 4 颗电子侦察卫星对机载目标非合作定位与测速

在此应用场景中, 设机载目标的运动速度仍然为(183, 172, 150)m/s, 且机载辐射源的频率为 1.6 GHz, 电子侦察卫星的时差测量精确度为 50 ns(r.m.s), 频差测量精确度为 5 Hz(r.m.s)。采用迭代法对前面给出的时差定位方程式(2)进行求解, 然后利用式(2)的定位结果对测速方程式(6)进行直接求解。通过 100 次蒙特卡罗仿真, 所得的定位误差曲线和测速误差曲线见图 3 和图 4。

由图 3 和图 4 可见, 4 颗电子侦察卫星定位与测速仿真试验中, 100 次仿真的定位误差平均值为 220 m, 速度误差平均值为 13.88 m/s。定位误差与测速误差相对于导航卫星来说都相应变大, 这主要是参数测量精确度所带来的影响, 由前可知: 电子侦察卫星的时差测量精确度为 50 ns(r.m.s), 频差测量精确度为 5 Hz(r.m.s), 如果将时差测量精确度与频差测量精确度进一步提高, 其定位误差与测速误差也会相应减小。通过上述仿真结果的对比可知, 卫星电子侦察的时差定位模型与卫星导航定位模型在满足式(3)的约束条件下是相通的, 卫星电子侦察的频差测速模型与卫星导航测速模型在满足式(7)的约束条件下是相通的。

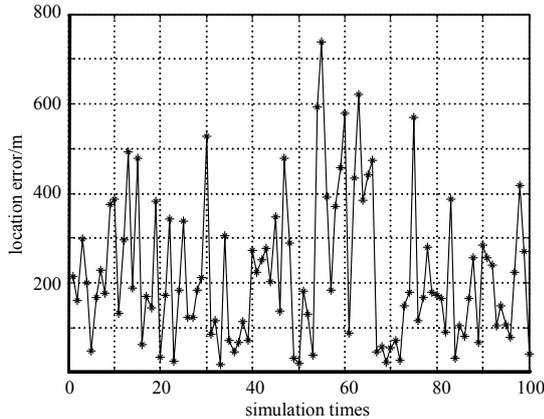


Fig.3 TD OA location error for 4 electronic reconnaissance satellites simulation
图 3 四星时差定位误差仿真曲线

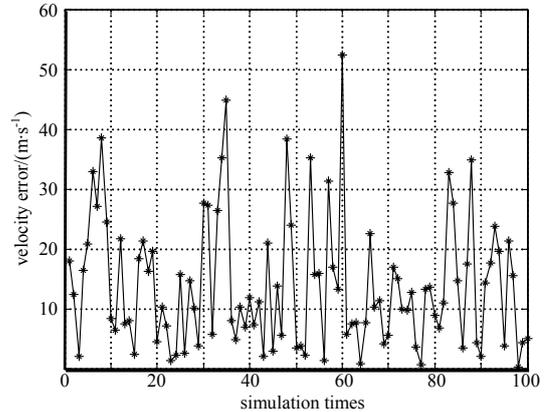


Fig.4 FDOA velocity error for 4 electronic reconnaissance satellites simulation
图 4 四星频差测速误差仿真曲线

3) 3 颗电子侦察卫星对海面目标非合作定位与测速

在此应用场景中, 设海面目标的运动速度为(39,36,0)m/s, 且舰载辐射源的频率为 2.8 GHz, 电子侦察卫星的时差测量精确度为 50 ns(r.m.s), 频差测量精确度为 5 Hz(r.m.s)。在前面仿真条件下, 4 颗卫星中选取前 3 颗卫星进行仿真。采用迭代法对前面给出的时差定位方程式(8)进行求解, 然后利用式(8)的定位结果对测速方程式(9)进行直接求解。通过 100 次蒙特卡罗仿真, 所得的定位误差曲线和测速误差曲线见图 5 和图 6。

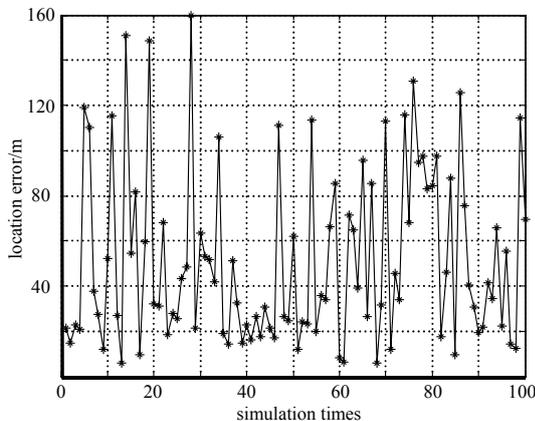


Fig.5 TD OA location error for 3 electronic reconnaissance satellites simulation
图 5 三星时差定位误差仿真曲线

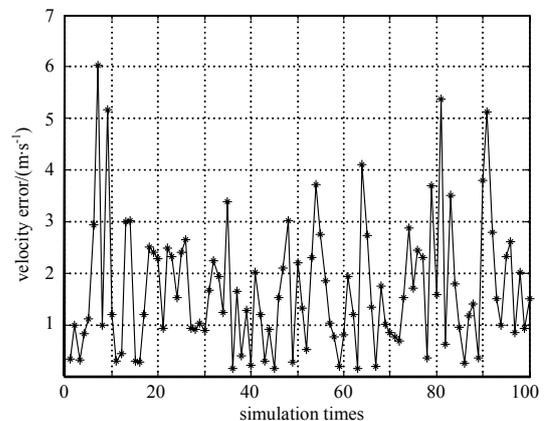


Fig.6 FDOA velocity error for 3 electronic reconnaissance satellites simulation
图 6 三星频差测速误差仿真曲线

由图 5 和图 6 可见, 3 颗电子侦察卫星定位与测速仿真试验中, 100 次仿真的定位误差平均值为 51.2 m, 速度误差平均值为 1.68 m/s。之所以定位与测速误差比前面仿真试验结果要小, 其主要原因是所采用的假设条件为: 高度上的位置与速度是精确已知的, 且没有误差。而在实际定位测速实施过程中, 高度方向上的误差是主要的误差来源, 正因为引入了上述假设条件, 仿真所得误差数值偏小。上述仿真结果说明: 在 3 颗卫星条件下通过引入应用边界约束条件也能完成对地面辐射源的定位与测速。

从上述仿真数据也可以看出, 时差测量精确度越高, 得到的定位误差越小; 频差测量精确度越高, 得到的测速误差也越小。上面仿真结果所给出的多颗电子侦察卫星的定位误差与测速误差相对于导航卫星来说大了许多, 主要原因是在非合作条件下, 电子侦察中的时差和频差测量精确度都达不到导航应用中的精确度, 所以误差偏大。

5 结论

本文从导航卫星对地面目标的合作式定位与速度测量应用出发,在阐述其定位与测速基本原理与数学模型的基础上,选定其中一颗导航卫星的测量方程为参考,通过方程对消掉导航接收机本身固有的时间偏差项 ΔT 与频率偏差项 ΔF ,得到了另一种形式的导航定位与测速方程,而这一方程与多星电子侦察对地非合作式TDOA时差无源定位与FDOA频差无源测速方程完全吻合,并通过仿真对上述关系进行了验证。这一分析结果揭示了合作式卫星导航对地定位测速和非合作式卫星电子侦察对地定位测速在数学模型上的本质联系,从而为后续将卫星导航的定位测速相关处理方法与流程,借鉴并应用到卫星电子侦察的定位与测速上,为多颗电子侦察卫星对辐射源目标的高精确度定位,以及三维运动速度测量方面的应用提供更好的条件。另一方面,这对于航天电子侦察中对辐射源目标的跟踪与识别等应用也具有重要的参考意义。

参考文献:

- [1] ELLIOTT D Kaplan,CHRISTOPHER J Hegarty. Understanding GPS Principles and Applications[M]. 2nd ed. Norwood,MA, USA:ARTECH HOUSE INC, 2006.
- [2] 吴军伟,梁涛涛,秦代成,等. 一种GNSS信号捕获中的比特压缩与重构方法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014,12(5):697-701. (WU Junwei,LIANG Taotao,QIN Daicheng,et al. A bit compress and recover approach in GNSS signal acquisition[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014,12(5):697-701.)
- [3] 熊群力,陈润生,杨小牛,等. 综合电子战—信息化战争的杀手锏[M]. 2版. 北京:国防工业出版社, 2008. (XIONG Qunli, CHEN Runsheng,YANG Xiaoniu,et al. Integrated EW:Keystone in Information Warfare[M]. 2nd ed. Beijing:National Defense Industry Press, 2008.)
- [4] 郭福成,樊云,周一宇,等. 空间电子侦察定位原理[M]. 北京:国防工业出版社, 2012. (GUO Fucheng,FAN Yun,ZHOU Yiyu, et al. Localization Principle in Space Electronic Reconnaissance[M]. Beijing:National Defense Industry Press, 2012.)
- [5] PAN Xianjun,WU Yanhong. Modeling and simulations of ECCM of ocean surveillance satellite electronic intelligence[C]// 2012 5th International Conference on Biomedical Engineering and Informatics. Chongqing:[s.n.], 2012:1476-1480.
- [6] 王萌,马利华,张丽荣,等. 区域定位系统中高程辅助三星定位算法[J]. 上海交通大学学报, 2012,46(10):1647-1652. (WANG Meng,MA Lihua,ZHANG Lirong,et al. Three-satellite positioning algorithm with altitude aiding for regional navigation satellite system[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2012,46(10):1647-1652.)
- [7] XUE Yanrong,LI Xiaohui,XU Longxia,et al. Research on position differential method of dual-satellites TDOA and FDOA in passive location system[C]// 2012 IEEE International Frequency Control Symposium. Baltimore,MD:[s.n.], 2012:21-24.
- [8] 顾黎明,朱建丰,何新生. 高轨四星时差定位技术研究[J]. 通信对抗, 2014,33(1):23-26. (GU Liming,ZHU Jianfeng,HE Xinsheng. Research of location technology on TDOA with four geosynchronous satellites[J]. Communication Countermeasures, 2014,33(1):23-26.)
- [9] 石荣,阎剑. 径向运动测距单站定位的时差频差分析模型[J]. 探测与控制学报, 2013,35(5):37-41. (SHI Rong,YAN Jian. TDOA/FDOA analysis model of radial moving single observer location[J]. Journal of Detection & Control, 2013,35(5):37-41.)
- [10] DENG Bing,XIONG Jinyu,XIA Changxiong. The observability analysis of aerial moving target location based on dual-satellite geolocation system[C]// 2012 International Conference on Computer Science and Information Processing. Xi'an,Shaanxi, China:[s.n.], 2012:12-15.
- [11] 叶尚福,孙正波,夏畅雄,等. 卫星干扰源双星定位技术及工程应用[M]. 北京:国防工业出版社, 2013. (YE Shangfu,SUN Zhengbo,XIA Changxiong,et al. Technology and Application on the Jamming Resource Location by Two Satellites[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013.)
- [12] WU Shilong,LUO Jingqing,GONG Liangliang. Joint FDOA and TDOA location algorithm and performance analysis of dual-satellite formations[C]// 2010 2nd International Conference on Signal Processing Systems. Dalian,China:[s.n.], 2010:339-342.
- [13] YANG Yuxiang,XIONG Jinyu,TONG Wuqin. Estimation of the time-varying location parameters of a moving target in dual and tri-satellites geo-location system[C]// 2012 5th International Congress on Image and Signal Processing. Chongqing, Sichuan,China:[s.n.], 2012:1801-1805.

作者简介:



石 荣(1974-),男,四川省岳池县人,博士,研究员,主要从事电子对抗,通信与雷达系统方面的研究.email:wyx1719@sina.com.

张 伟(1985-),男,山东省泰安市人,硕士,工程师,主要从事电子侦察方面的研究。

刘 畅(1988-),女,四川省安岳县人,硕士,工程师,主要从事电子侦察方面的研究。