联合卡尔曼法消除无线定位中的非视距误差

王意锋，季中恒，葛宝忠
（信息工程大学 国家数字交换系统工程技术研究中心，河南 郑州 450002）

摘 要：通过分析测量值丢弃法和整体平移法的优势和局限性，提出了联合卡尔曼法。它采用设置标准差门限把测量值丢弃法融合到整体平移法中，利用测量值丢弃法在处理偏差较大的测量值方面的优势，消除偏差较大的测量值对后续估计值的影响，有效抑制了卡尔曼滤波的不收敛，降低了对可采用系数的限制，从而使可采用的系数进一步降低，更大程度地消除了非视距误差，提高定位精度。

关键词：非视距传播 非视距误差 卡尔曼滤波

由于美国联邦通讯委员会（Federal Communications Commission）在 E-911 标准中要求无线通信网络运营商必须能够提供基于移动用户的位置估计的功能，无线定位越来越受到研究人员的关注[1]。目前，对无线定位技术研究的目的就是利用各种通信标准中的现有资源，在复杂的无线通信环境中，提高无线定位的精度。由非视距 NLOS（Non-Line of Sight）传播引起的非视距误差是影响定位精度的主要因素，它使时间测量值发生正向偏差，从而导致定位的结果产生较大的偏差。若能消除非视距误差对定位参数的影响，就可以使定位精度在很大程度上得以提高。

卡尔曼滤波是最小均方误差意义上的滤波，它采用递归迭代算法，可以应用于平稳和非平稳环境，对统计特性未知的模型尤其有效，它的每一次更新都是由前一次估计值和当前输入值计算所得，更有利于实时处理[2]。因此利用卡尔曼滤波来消除非视距误差的影响是比较理想的方法，但直接利用卡尔曼滤波消除测量值的非视距误差效果并不理想，需要对卡尔曼滤波器做适当的改进，从而达到比较理想的效果。

基于非视距误差特点，目前主要采用两种改进的卡尔曼滤波方法消除非视距误差，一种是测量值丢弃法；另一种是整体平移法。测量值丢弃法是在估计偏差较大的测量值时通过把卡尔曼增益设置为零来丢弃该测量值；整体平移法是通过适当的修正卡尔曼增益，实现估计值的整体向下平移。两种方法用于不同的通信环境。受 NLOS 影响严重而偏差较大的情况下，采用丢弃该测量值的方法效果比较理想；而对于受 NLOS 影响不很严重的测量值，估计值的偏差比较小，采用整体平移法效果比较理想。本文在上述两种方法的基础上，针对两者的局限性提出了联合卡尔曼法，通过设置偏差门限把测量值丢弃法融合到整体平移法中使用。

1 卡尔曼滤波原理及迭代过程

卡尔曼滤波信号流图如图 1 所示。

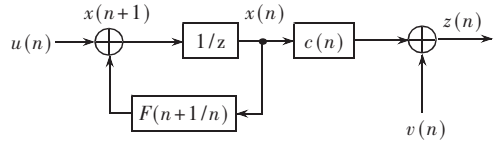

图 1 卡尔曼滤波信号流图

状态方程：

$$x_{n+1}=Fx_n+u_n \tag{1}$$

观测方程：

$$z_n=c_x+v_n \tag{2}$$

其中，x_n 和 z_n 分别是第 n 个时刻的状态向量和观测向量，F 和 c 分别是状态转移矩阵和观测矩阵，u_n 和 v_n 分别是第 n 个时刻的激励噪声和观测噪声，方差分别是 Q_n 和 R_n。迭代过程如下：

$$\tilde{x}_n=F\hat{x}_{n-1} \tag{3}$$

$$\tilde{K}_n=F\hat{K}_{n-1}F^{\mathrm{T}}+Q \tag{4}$$

$$e_n=z_n-C\tilde{x}_n \tag{5}$$

$$G_n=\tilde{K}_nC_n^{\mathrm{T}}(C_nK_nC_n^{\mathrm{T}}+R_n)^{-1} \tag{6}$$

$$\hat{x}_n=\tilde{x}_n+G_ne_n \tag{7}$$

$$\hat{K}_n=(I-G_nC_n)\tilde{K}_n \tag{8}$$

其中，$\tilde{x}_n$ 和 $\hat{x}_n$ 分别是第 n 个时刻状态变量的预测值和估计值，$\tilde{K}_n$ 和 $\hat{K}_n$ 分别是第 n 个时刻的预测误差的协方差矩阵和估计误差的协方差矩阵，e_n 是测量向量 z_n 所对应的信息，G_n 是第 n 个时刻的卡尔曼增益。

2 测量值丢弃法和整体平移法

2.1 测量值丢弃法

测量值丢弃法是通过卡尔曼滤波器把偏差较大的测量值丢弃的方法。该方法通过比较偏差与门限值的大小来判断当前测量值的偏差是否在所能容忍的误差范围内。

$$G'_n=\begin{cases}0, & \sigma>\text{threshold}\\ G_n, & \sigma\le\text{threshold}\end{cases} \tag{9}$$

即：用(9)式的 G'_n 替代(7)式和(8)式中的 G_n。其中 G'_n 表示修正后的卡尔曼增益，σ 是测量值的标准差，threshold 是标准差的门限值。

在测量值丢弃法中，对门限值的设置也有一定要求，若设置过高，会使一些偏差较大的测量值不能被舍去，从而不能有效地消除 NLOS 误差，降低定位的精度；若设置得过低，则会丢弃过多的测量值，估计值不再随测量值变化，导致卡尔曼滤波器不收敛[3]。因此门限值的设置在测量值丢弃法中显得特别重要。

测量值丢弃法消除偏差较大的测量值的非视距误差比较有效，而在测量值偏差较小的情况下效果就不很理想，经过滤波器输出的结果甚至比实际测量到的测量值的偏差还要大。该方法主要用于消除随机误差，适用于非视距影响比较严重的环境。

2.2 整体平移法分析

整体平移法是利用非视距误差总使测量值产生正向偏差的特性，采用修正卡尔曼增益的方法把估计值整体向下平移，达到消除非视距误差的目的。该方法在消除偏差较小的测量值的非视距误差上具有优势，但不能有效消除偏差较大的测量值对后续估计值的影响。

由(8)式可知，信息 e_n 表示在预测值的基础上，对估计值修正的方向和大小。当 e_n 大于零，表示估计值大于预测值，可以通过减小卡尔曼增益来减小预测值的正向修正程度；反之，如果 e_n 小于零，则表示估计值小于预测值，就可以增大卡尔曼增益来增大预测值的负向修正程度[3]，卡尔曼增益的改变是通过把原来的卡尔曼增益乘以或除以一个系数 $\alpha(0<\alpha<1)$ 来实现。即：

$$G'_n=\begin{cases}G_n\times\alpha, & e_n>0\\ G_n/\alpha, & e_n\le 0\end{cases} \tag{10}$$

即：用(10)式中的 G'_n 替代(7)式和(8)式中的 G_n。其中 G'_n 是修正后的卡尔曼增益。

由分析可知：系数 α 的大小决定估计值向下平移的程度，进一步决定非视距误差的消除程度。系数 α 越大，估计值向下平移的幅度就越小，非视距误差消除越少；反之，系数 α 越小，估计值向下平移的幅度就越大，非视距误差消除越多。实际应用中，要求采用最小的系数 α，以达到完全消除非视距误差的目的，但是系数 α 减小的同时也带来一个问题，就是卡尔曼滤波不收敛，为了避免这个问题，往往对所采用的系数有一定限制。

3 联合卡尔曼法的提出

联合卡尔曼法是针对测量值丢弃法和整体平移法的局限性而提出的，它采用设置偏差门限的方法把测量值丢弃法融合到整体平移法中，从而使其同时具备两种方法的优点而又克服了两种方法的局限性。

联合卡尔曼法采用先设置标准差门限，然后把测量值的偏差与标准差门限进行比较，偏差超过门限值就认为偏差较大，就采用测量值丢弃法；反之，认为偏差较小，就采用整体平移法。偏差的大小采用标准差来衡量，即：

$$G''_n=\begin{cases}0, & \sigma>\text{threshold}\\ G'_n, & \sigma\le\text{threshold}\end{cases} \tag{11}$$

$$G'_n=\begin{cases}G_n\times\alpha, & e_n>0\\ G_n/\alpha, & e_n\le 0\end{cases} \tag{12}$$

利用(11)式中的 G''_n 替代(7)式和(8)式中的 G_n。其中，G''_n 表示联合卡尔曼法修正后的卡尔曼增益，G'_n 表示整体平移法修正后的卡尔曼增益，σ 是测量值的标准差，threshold 是标准差的门限值。

通过上述融合的方法，不仅利用了整体平移法在消除偏差较小的测量值的非视距误差上的优势，而且也充分利用测量值丢弃法在消除偏差较大的测量值的非视距误差上的优势，消除了偏差较大的测量值对后续估计值的不良影响，有效地抑制了卡尔曼滤波的不收敛，降低了对可采用系数的限制，从而使可采用的系数 α 得到进一步降低，非视距误差得到更大程度的消除，有效地提高了定位的精度。

4 仿真与分析

非视距误差为正随机变量，一般认为它符合基于均方根时延扩展 τ_{rms} 的指数分布、均匀分布或 Delta 分布的模型[4]。

假设定位基站的位置为 (0,0)，被定位移动台从(1000,0)沿平行于 y 轴方向移动到(1000,1000)，然后平行于 x 轴的方向移动到(0,1000)，被定位移动台和定位基站的距离与采样时间关系如图 2 所示。整个过程移动速率始终是 20 米/秒，每秒采样一次，则在一次实验中就可以获得 100 个距离测量值，每次实验计算一个均方根误差，重复实验 50 次，取 50 次实验获得均方根误差的平均值作为各种方法的均方根误差，即作为测量值误差的标准差。

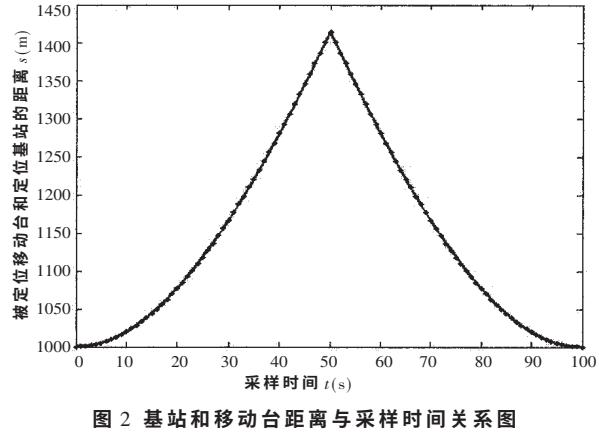

图 2 基站和移动台距离与采样时间关系图

用 MATLAB 仿真软件，依照上述模型所得的均方根误差，分别采用测量值丢弃法、整体平移法和联合卡尔曼法消除非视距误差得到的仿真结果分别如图 3~5 所示。

在图 3~图 5 中横坐标 1~12 表示非视距误差的不同分布模型以及在各种模型下的不同环境类型。其中，横坐标 1~4 表示非视距误差呈 Delta 分布，基中，横坐标 5~8

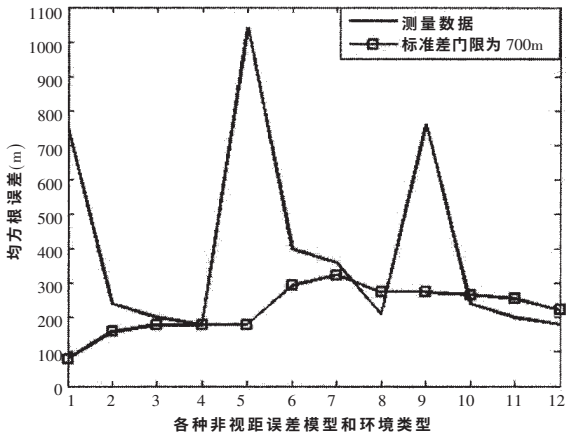

图 3 测量值丢弃法消除非视距误差仿真图

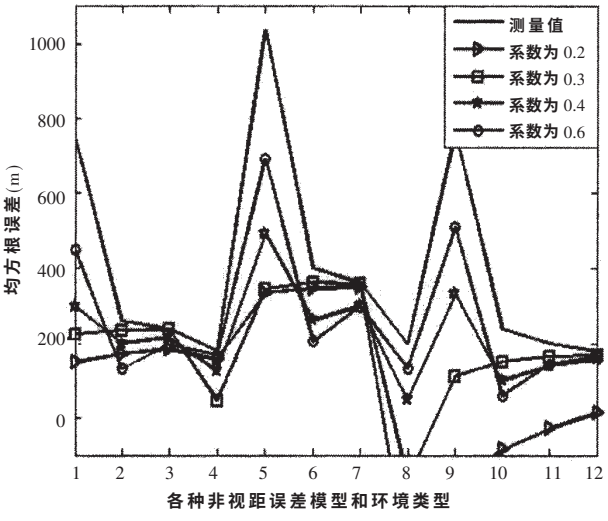

图 4 整体平移法消除非视距误差仿真图

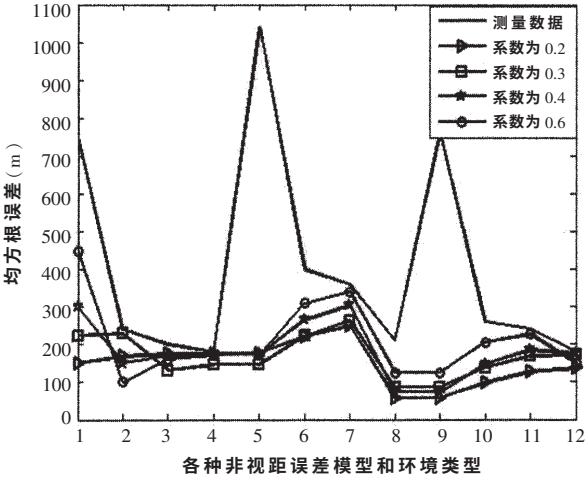

图 5 联合卡尔曼法消除非视距误差仿真图

表示非视距误差呈均匀分布,横坐标 9~12 表示非视距误差呈指数分布。在每种分布类型下的四个横坐标分别表示传输环境恶劣的市区(1、5、9)、市区(2、6、10)、郊区(3、7、11)、传输环境较好的农村(4、8、12)四种环境类型。

非视距误差总是正值,范围是 0~1300 米,经过在蜂窝网络中现场测试表明,平均非视距误差可以达到 500~700 米[5]。图 3 和图 5 中的标准差门限均设置为 700 米。

由图 3 分析可知,测量值丢弃法在消除偏差较大的测量值方面具有很大的优势,如图中每个分布类型中的传输环境恶劣的市区,均方根误差大都能降至 300 米以下,而在其他环境中非视距误差消除效果则不很理想,甚至会进一步影响测量值。

由图 4 分析可知,整体平移法在消除偏差较小的测量值的非视距误差方面具有优势。图中,每个分布类型中的郊区和农村,以采用系数 0.4 为例,均方根误差都降至 300 米以下,而对于市区中的测量值的非视距误差消除就不很明显,并且由于受传输环境恶劣的市区中偏差较大的测量值影响,该方法在实际中采用的系数不能小于 0.4,否则就会出现卡尔曼滤波不收敛的情形。

由图 5 仿真结果可知,联合卡尔曼法明显优于上述两种方法,以采用系数 0.2 为例,经过联合卡尔曼法消除非视距误差后整体的均方根误差都降至 220 米以下,并且趋于平缓,偏差较大的测量值对后续估计值的不良影响基本消除。把测量值丢弃法融合到整体平移法中使用,有效地抑制了整体平移法中出现的卡尔曼滤波不收敛,可采用的最小系数也由整体平移法中的 0.4 降到了 0.2,从而使非视距误差得到进一步的消除,定位精度进一步提高。在采用相同系数的前提下,由于联合卡尔曼法消除了偏差较大的测量值对后续估计值的影响,非视距误差的消除效果也比整体平移法有所改善。联合卡尔曼法在非视距误差呈 Delta、均匀和指数分布,非视距误差的消除效果均比较理想。

联合卡尔曼法既充分利用了整体平移法在消除偏差较小的测量值的非视距误差上的优势,也利用了测量值丢弃法在消除偏差较大的测量值的非视距误差上的优势,消除了偏差较大的测量值对后续估计值的影响,有效抑制了整体平移法中出现的卡尔曼滤波不收敛问题,从而使可采用的系数进一步降低。非视距误差更大程度的消除,提高了无线定位的精度,使用范围也得到了拓宽。

参考文献

[1] 范平志,邓 平,刘 林. 蜂窝网无线定位[M].北京:电子工业出版社,2002.

[2] SIMON H 著, 郑宝玉译. 自适应滤波器原理[M].北京:电子工业出版社,2003.

[3] 李 静,刘 琚.用卡尔曼滤波器消除 TOA 中 NLOS 误差的三种方法.通信学报[J],2005,26(1):131-135.

[4] CHEN P C.A non-line-of-sight error mitigation algorithm in location estimation[A]. Wireless Communication and Networking Conference [C]. 1999:316-320.

[5] SILVENTOHNEN M I,RANTALAINEN T. Mobile station emergency locating in GSM [A]. IEEE International Conference on Personal Wireless Communication [C]. 1996: 232-238.

(收稿日期:2006-09-06)