引文格式：王长栓,鲍烨青,李伟. 基于质量评价函数的自适应组合导航定位方法[J]. 地理空间信息, 2025, 23(6):109-112. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2025.06.024

基于质量评价函数的自适应组合导航定位方法

王长栓[1]，鲍烨青[2*]，李　伟[3]
（1. 广西壮族自治区地理信息测绘院，广西 柳州 545006；2. 中国电力工程顾问集团中南电力设计院有限公司，湖北 武汉 430071；
3. 广西科之新科技有限公司，广西 南宁 530007）

摘　要：惯性导航系统（inertial navigation system，INS）可以与GNSS形成互补，但INS存在累积误差的问题，且GNSS位置噪声大小未知。为了提高导航定位的精度，提出一种基于质量评价函数的自适应GNSS/INS组合定位算法。选择几何精度衰减因子（geometric dilution of precision，GDOP）、平均信噪比、可见卫星数、平均卫星仰角和多径效应5个指标，采用变异系数定权法进行指标加权，计算出综合的GNSS质量评价指标。基于该指标，通过自适应卡尔曼滤波对量测噪声阵进行调节，从而提高定位精度。实验结果表明，所提出的方法在复杂城市环境下的GNSS/INS松组合定位中，水平方向和垂直方向的定位精度分别提升了41.20%和31.90%。

关键词：GNSS质量评价函数；松组合算法；自适应卡尔曼滤波；变异系数定权法
中图分类号：P228　　文献标志码：B　　文章编号：1672-4623（2025）06-0109-04

Adaptive Combination Navigation and Localization Method Based on Quality Evaluation Function

WANG Changshuan[1], BAO Yeqing[2], LI Wei[3]
(1. Geographic Information Surveying and Mapping Institute of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Liuzhou 545006, China;
2. Central Southern Electric Power Design Institute Co., Ltd. of CPECC, Wuhan 430071, China;
3. Guangxi Kezhixin Science and Technology Co., Ltd., Nanning 530007, China)

Abstract: Inertial navigation system (INS) can complement GNSS, but INS suffers from the problem of cumulative error and the magnitude of GNSS position noise is unknown. In order to improve the accuracy of navigation and localization, we proposed an adaptive GNSS/INS combination localization method based on quality evaluation function. In this paper, we selected five indicators, namely geometric dilution of precision (GDOP), average signal-to-noise ratio, number of visible satellites, average satellite elevation angle and multipath effect, used the coefficient of variation weighting method to carry out the weighting of indicators, and computed the comprehensive GNSS quality evaluation index. Based on this index, we adjusted the measurement noise array by adaptive Kalman filtering, to improve the localization accuracy. The experimental result shows that the proposed method improves the horizontal and vertical positioning accuracy by 41.20% and 31.90%, respectively, in the GNSS/INS loose combination positioning in complex urban environment.

Key words: GNSS quality evaluation function, loose combination algorithm, adaptive Kalman filtering, coefficient of variation weighting method

卡尔曼滤波[1]是实现GNSS/INS组合导航的基础和支撑，它不仅可以得出更为准确的位置、速度和姿态，还能将计算所得的误差反馈至INS中，从而抑制INS的误差发散[2]。在卡尔曼滤波中误差协方差矩阵未知时，精度会大大降低甚至导致卡尔曼滤波发散。大量学者致力于对卡尔曼滤波进行改进，但依旧有部分缺陷需要克服[3-6]。

本文针对低成本GNSS/INS芯片，提出了一种基于GNSS质量评估函数的自适应定位算法。选取平均信噪比、可见卫星数、平均卫星仰角、多径效应、精度衰减因子（dilution of precision，DOP）5个指标，对其进行同趋势化、无量纲化，并利用变异系数定权法进行线性组合，综合得出GNSS质量评价指标。根据该指标设置质量评价函数，对量测噪声阵进行调节，以科学评估GNSS观测值的可信度，剔除不可用数据或调整质量较差的观测值可信度，避免松组合产生较大误差，从而在城市复杂环境中实现更好的定位与导航服务。

1　基于变异系数定权法的GNSS质量评价函数

1.1　质量评价指标

1）GDOP。GNSS定位的准确性取决于可见卫星星座和测量误差，GNSS领域引入精度因子DOP的概

项目来源：中央引导地方科技发展资金专项资助项目（2022SRZ0101）。
第一作者简介：王长栓（1980—），本科，高级工程师，从事测绘地理信息应用工作，E-mail：9798727@qq.com。
通信作者：鲍烨青（1998—），硕士研究生，工程师，从事北斗高精度定位工作，E-mail：1020844841@qq.com。

念来表示可见卫星的几何形态，本文选取GDOP作为GNSS质量衡量指标。GDOP受可见卫星的几何分布影响，在空旷环境中，GDOP值较小，在城市复杂环境下，由于可见卫星几何构型变差，GDOP值增大。

2）平均信噪比。信噪比SNR（Signal-to-Noise Ratio）是衡量信号质量的关键指标之一，它可以反映信号与噪声之间的相对强度，通常情况下信噪比越大，信号质量就更优异。本文选取同一历元的信噪比均值为质量评价指标之一，平均信噪比计算公式如下：

$$\overline{\mathrm{SNR}^t}=\frac{1}{N_j}\sum_{j=1}^{N_j}\mathrm{SNR}_j^t \tag{1}$$

式中，$\overline{\mathrm{SNR}^t}$ 为 t 历元的SNR平均值；N_j 为 t 历元的观测卫星总数；SNR_j^t 为 t 历元 j 卫星的信噪比。

3）可见卫星数。GNSS可见卫星数也是评价GNSS性能的重要指标之一，可见卫星数指的是该接收机在同一历元接收到的卫星信号的数量。可见卫星数受多种因素影响，包括接收器所在环境（如在开阔地带或城市峡谷中）、时间（一天中的不同时间段）、以及大气条件等。一般来说，可见卫星数越多，GNSS观测质量越好；可见卫星数越少，GNSS质量观测越差。

4）平均卫星仰角。卫星的仰角是卫星与接收机所在处的地平线之间的夹角，本文取同一历元的卫星仰角均值为质量评价指标之一。在GNSS定位中，仰角被广泛应用于确定卫星的权重。仰角越大，受周边障碍物影响越小，受多径影响也越小。

5）平均多路径效应。多路径效应是指接收机在接收到卫星发射的直射信号的同时，还同时接收到来自测站周围地物的反射信号，2种信号干涉叠加，引起附加时间延迟或相位延迟，从而使观测值偏离真值，产生多路径误差。多路径效应误差越大，GNSS观测质量就越差。

1.2 综合质量评价指标计算

变异系数定权法是根据统计学方法计算出各指标变化程度的方法，直接利用各指标的信息计算得到权重。本小节主要介绍了变异系数定权法在计算综合指标 T 中的应用，T 的计算过程，主要分为4个步骤：指标同趋势化、指标无量纲化、指标权重系数确定、线性组合。

1）指标同趋势化。所选取的指标中平均卫星仰角、平均信噪比和观测卫星数的值在通常情况下均为该指标越大表示GNSS观测质量越好；而GDOP值和平均多径效应则相反，均为越小表示GNSS质量越好。为将选取的5个指标进行同趋势化，将平均卫星仰角、平均信噪比、观测卫星数3个值取其相反数，GDOP值与多径效应则不进行改动。

2）指标无量纲化。综合指标计算中的指标单位并不统一，无量纲化可以消除不同物理量之间由于量纲引起的数量级差异，使得它们具有可比性，有助于数据的标准化和比较。本文选取的无量纲化公式如下：

$$S_i=\frac{x_i-\mathrm{Min}_i}{\mathrm{Max}_i-\mathrm{Min}_i} \tag{2}$$

式中，x_i 为同趋势化后的第 i 个指标，本文共选取5个指标故而 i 的取值为1~5；Min_i 为第 i 个指标的最小值；Max_i 为第 i 个指标的最大值；S_i 为第 i 个指标无量纲化后的结果。

3）指标权重系数确定。变异系数法可以较好地反映指标的变异程度。变异系数越大表示该指标越难以实现，更能反映GNSS质量的差距，对应的权重也越大[4]。权重计算公式如下：

$$CV_i=\frac{\sigma_i}{\mu_i} \tag{3}$$

$$W_i=\frac{CV_i}{\sum_{i=1}^{n}CV_i} \tag{4}$$

式中，σ_i 为第 i 个指标 m 个历元的样本标准差 $\sigma_i=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{m}(S_i-\mu_i)^2}{m-1}}$；$\mu_i$ 为第 i 个指标的均值 $\mu_i=\frac{\sum_{i=1}^{m}S_i}{m}$；$CV_i$ 为第 i 个指标的变异系数；W_i 为第 i 个指标的权值，本文只选取了5个指标，故 n 的值取5。

4）线性组合。前三步计算得出权重后，用线性组合计算得出最后的GNSS质量综合评价指标 T，计算公式如下：

$$T=\sum_{i=1}^{N}W_i\times S_i \tag{5}$$

本文选取5个指标，N 的取值为5；W_i 为第三步计算所得第 i 个指标的权重；S_i 为第二步所得第 i 个指标的无量纲结果。

2 改进自适应GNSS/INS松组合定位

松组合技术的核心在于运用卡尔曼滤波进行数据融合，卡尔曼滤波作为一种依托线性系统状态方程的算法，通过对系统输入输出观测数据的精细处理，在包含不确定因素的动态环境中，实现对系统状态的最优化估算。针对量测噪声的不确定性问题，本文创新性地提出一种基于GNSS质量评价函数的自适应卡尔曼滤波方法，该方法能够基于可靠依据预测系统未来

发展趋势，显著提升状态估计的精准度与效率。

2.1　卡尔曼滤波

离散卡尔曼滤波方程可表示为：

$$\boldsymbol{X}_k=\boldsymbol{\Phi}_{k/k-1}\boldsymbol{X}_{k-1}+\boldsymbol{\Gamma}_{k-1}W_{k-1} \tag{6}$$

$$\boldsymbol{Z}_k=H_k\boldsymbol{X}_k+V_k \tag{7}$$

式（6）为卡尔曼滤波的状态方程，式中，k 和 $k-1$ 分别为时刻 t_k 和 t_{k-1}；$\boldsymbol{X}_k$ 为大小 $n\times1$ 需要估计的状态向量；$\boldsymbol{\Phi}_{k/k-1}$ 为 t_k 到 t_{k-1} 时刻的状态一步转移矩阵，其大小为 $n\times n$；$\boldsymbol{\Gamma}_{k-1}$ 为系统噪声驱动阵，大小为 $n\times s$；W_{k-1} 为系统激励噪声，大小为 $s\times1$。式7为量测方程，$\boldsymbol{Z}_k$ 为 $\boldsymbol{t}_k$ 时刻的观测向量，大小为 $m\times1$；$\boldsymbol{H}_k$ 为 $m\times n$ 大小的观测矩阵；V_k 为量测噪声，大小为 $m\times1$，其中 V_k 和 W_k 为不相关的零均值白噪声序列，即满足式7，其中 $\boldsymbol{R}_k$ 为量测噪声方差阵，$\boldsymbol{Q}_k$ 为系统噪声方差阵：

$$\begin{cases}W_k\sim N(0,\boldsymbol{Q}_k)\\V_k\sim N(0,\boldsymbol{R}_k)\\E\left(W_kV_j^{\mathrm{T}}\right)=0\end{cases} \tag{8}$$

卡尔曼滤波的信息更新可以分为时间更新和量测更新两步，时间更新也被称为一步预测，时间更新步骤如下：

$$\hat{X}_{k/k-1}=\boldsymbol{\Phi}_{k/k-1}\hat{X}_{k-1} \tag{9}$$

$$P_{k/k-1}=\boldsymbol{\Phi}_{k/k-1}P_{k-1}\boldsymbol{\Phi}_{k/k-1}^{T}+Q_{k-1} \tag{10}$$

式中，$\hat{X}_{k/k-1}$ 和 $P_{k/k-1}$ 分别为 t_k 时刻对状态向量的预测值和该时刻状态最优估计的方差协方差阵的预测；$\hat{X}_{k-1}$ 和 P_{k-1} 分别为对 t_{k-1} 时刻状态向量的最优估值和该时刻的方差协方差阵的最优估值。

根据量测更新公式可以计算出状态向量的最优估值 $\hat{\boldsymbol{X}}_k$。

$$K_k=P_{k/k-1}H_k^{\mathrm{T}}\left(H_kP_{k/k-1}H_k^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{R}_k\right)^{-1} \tag{11}$$

$$\hat{\boldsymbol{X}}_k=\hat{\boldsymbol{X}}_{k/k-1}+K_k\left(Z_k-H\hat{\boldsymbol{X}}_{k/k-1}\right) \tag{12}$$

$$P_k=\left(I-K_kH_k\right)P_{k/k-1}\left(I-K_kH_k\right)^{\mathrm{T}}+K_k\boldsymbol{R}_kK_k^{\mathrm{T}} \tag{13}$$

在动态系统中，当存在信息不确定性时，卡尔曼滤波器可以基于当前观测数据对系统未来状态进行合理且有根据的预测。即使系统出现连续的干扰项，卡尔曼滤波器也能保持较高准确性，且速度较快[7]。

2.2　基于GNSS质量评价函数的自适应卡尔曼滤波

在卡尔曼滤波过程中，量测噪声阵描述了量测噪声的大小和相关性，是一个重要的参数，但由于量测噪声无法精确获得，目前主要通过实验或者经验确定。量测噪声阵越小，卡尔曼滤波器对于量测量的信任度就越高；反之，量测噪声阵越大，卡尔曼滤波器对于量测量的信任度就越低[8-12]。

由式（5）计算得到的综合质量评价指标 T 越小，代表GNSS观测质量越好，量测噪声越小。因此，T 值较小时应调低量测噪声阵，提高卡尔曼滤波器对于量测量的信任度。T 值的增加代表GNSS观测质量下降，量测噪声较大，此时放大量测噪声阵，降低卡尔曼滤波对量测量的信任度。

若量测噪声阵为 $\boldsymbol{R}$，GNSS质量评价函数为 $f(T)$，经过调节的量测噪声阵为 $\boldsymbol{R}_{\mathrm{new}}$，本文选取的调节方式为 $\boldsymbol{R}_{\mathrm{new}}=\boldsymbol{R}\times f(T)$，即将二者直接相乘。由于 T 越大，GNSS观测质量越差，量测噪声越大，因此在 T 的取值范围中，调节量测噪声阵的GNSS质量评价函数 $y=f(T)$ 应为增函数，随着 T 的增加而增加。对于第 k 个历元，本文选取方法具体公式可表示为：

$$\boldsymbol{R}_{\mathrm{k_new}}=\boldsymbol{R}_k\times f\left(T_k\right) \tag{14}$$

假设 $1/n$ 数据质量较差，剩余 $(n-1)/n$ 数据质量较好，找到 T 值的分界点 T_a。n 可以依据通过轨迹经过的开阔与遮挡区域的比例进行统计，T_a 对应的函数值 $f\left(T_a\right)$ 为1，即认为此时的GNSS观测质量为临界值，不对量测噪声阵进行修改。

当 $T>T_a$ 时，认为此时GNSS观测质量不佳，此时 $f(T)>1$，对量测噪声阵进行放大；当 $T<T_a$ 时，认为此时GNSS观测质量较好，此时 $f(T)<1$，调低量测噪声阵，以提高卡尔曼滤波对于量测值的信任度。

同时找到 T 值的最大值 $T_{\max}$ 和最小值 $T_{\min}$，根据情况自行设定 $f\left(T_{\max}\right)$ 和 $f\left(T_{\min}\right)$ 对应的取值，但是需要确保在 $\left[T_{\min},T_{\max}\right]$ 这一区间内GNSS质量评价函数为单调增函数，且经过点 $\left(T_a,1\right)$。

此时可以获得3个坐标点，分别为 $\left(T_{\min},f\left(T_{\min}\right)\right)$、$\left(T_a,1\right)$、$\left(T_{\max},f\left(T_{\max}\right)\right)$，并对其进行曲线拟合，选择符合要求的函数调整量测噪声矩阵即可。得出 $f(T)$ 表达式后可以对量测噪声进行调节实现基于GNSS质量评价函数的自适应卡尔曼滤波[13-16]，具体公式如下：

$$\hat{\boldsymbol{X}}_{k/k-1}=\boldsymbol{\Phi}_{k/k-1}\hat{X}_{k-1} \tag{15}$$

$$P_{k/k-1}=\boldsymbol{\Phi}_{k/k-1}P_{k-1}\boldsymbol{\Phi}_{k/k-1}^{\mathrm{T}}+Q_{k-1} \tag{16}$$

$$\boldsymbol{R}_{k_new}=\boldsymbol{R}_k\times f\left(T_k\right) \tag{17}$$

$$\tilde{\boldsymbol{Z}}_{k/k-1}=\boldsymbol{Z}_k-H_k\hat{\boldsymbol{X}}_{k/k-1} \tag{18}$$

$$C_k=H_kP_{k/k-1}H_k^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{R}_k \tag{19}$$

$$\beta=\sqrt{\frac{\tilde{\boldsymbol{Z}}_{k/k-1}^{T}\tilde{\boldsymbol{Z}}_{k/k-1}}{\mathrm{tr}\left(C_k\right)}} \tag{20}$$

随后构造自适应因子 α 并调整卡尔曼滤波增益 K_k，其中c为常值，取0.9～1：

$$\alpha=\begin{cases}1, |\beta|\le c\\ \dfrac{c}{|\beta|}, |\beta|>c\end{cases} \tag{21}$$

$$K_k=\left(1/\alpha\right)P_{k/k-1}H_k^{\mathrm{T}}\left(H_kP_{k/k-1}H_k^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{R}_k\right)^{-1} \tag{22}$$

$$\hat{X}_k=\hat{X}_{k/k-1}+K_k\left(Z_k-H\hat{X}_{k/k-1}\right) \tag{23}$$

$$P_k=\left(I-K_kH_k\right)P_{k/k-1}\left(I-K_kH_k\right)^{\mathrm{T}}+K_k\boldsymbol{R}_kK_k^{\mathrm{T}} \tag{24}$$

3 实验与分析

3.1 测试设备及测试方法

本文使用SCH634惯性测量单元采集IMU数据，采样频率为200 Hz。使用Novatel SPAN收集GNSS流动站含星历Nav文件和卫星观测OBS文件的原始观测值，GNSS采样频率为1 Hz，其中约10%的路径位于信号遮挡区域。同时用Novatel OEMV收集GNSS基站的原始观测数据，便于后期进行差分定位获取实验结果参考值，采样频率为1 Hz，本实验GNSS的测量噪声使用位置的标准差，INS观测值的权重由白噪声的方差VRW²和ARW²以及陀螺零偏、加速度计等的参数设置。

本文共进行6组实验，选取不同GNSS观测值质量好坏比例、T 值计算函数参数，具体参数设置如表1所示。

表1 实验组别设置

实验组别	A	B	C	D	E	F
GNSS较差数据所占百分比/%	50	10	50	10	0	100
分界点 T_a	0.062 661	0.089 907	0.062 661	0.089 907	\	\
$f(T_{\max})$ 取值	1.5	1.5	1.1	1.1	\	\
$f(T_{\min})$ 取值	0.5	0.5	0.9	0.9	\	\

3.2 实验结果分析

实验分6组进行，每组实验分别可以得出4组数据，包括：卡尔曼滤波方法（kalman filter，KF）得出的融合数据结果、自适应卡尔曼滤波（adaptive kalman filter，AKF）的融合数据结果、基于GNSS质量评价函数的卡尔曼滤波融（kalman filter with quality，KFQ）合数据结果、基于GNSS质量评价函数的自适应卡尔曼滤波（adaptive kalman filter with quality，AKFQ）融合定位结果。

从图1和图2可以看出，前半段时间定位精度较高，整体定位误差都偏小；而后半段时间由于加入了较差的时间段，但是KFQ一直低于KF误差曲线，而AKF和AKFQ曲线误差范围更小、波动更小。

图3和图4分别为B组和A组垂直方向的位置误差曲线。同A组相似，未加入较差观测值的历元定位精度较高，整体定位误差都偏小，而部分历元由于加入了较差的GNSS观测数据整体定位效果较差的时间段，但是KFQ一直低于KF误差曲线，而AKF和AKFQ曲线误差范围更小、波动更小，表明质量评价函数在复杂定位场景的定位效果好，抗干扰能力强。

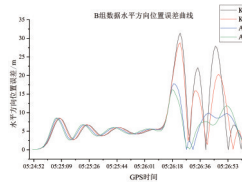


图1 B组数据水平方向位置误差

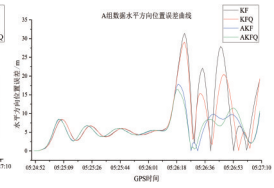


图2 A组数据水平方向位置误差

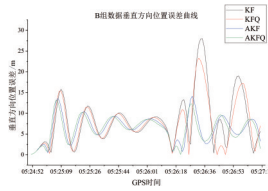


图3 B组数据垂直方向位置误差

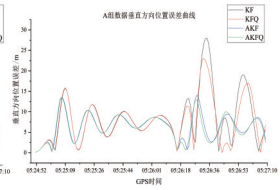


图4 A组数据垂直方向位置误差

本文所选取的6组实验数据中A、B、C、D四组数据均提升了松组合定位精度，但是E和F组中部分数据对于松组合精度不升反降，证明了本文所选取方法的可行性。同时，选择最适合定位测试场景的分界点 T_a 的B组数据定位结果提升效果最明显。

综合来看，对于本次测试场景下松组合提升效果最好、最全面的为B组实验，其质量评价函数为：

$$f(T)=-0.228\,5\times T^{-0.486\,1}+1.737 \tag{25}$$

本文所选取的基于该质量评价函数的自适应卡尔曼滤波，相较于卡尔曼滤波所得松组合位置结果精度在水平和垂直方向上分别提升了41.20%、31.90%。

4 结 语

本文主要使用基于GNSS质量评价函数的自适应卡尔曼滤波对低成本的GNSS、INS数据进行松组合。

为验证所采用方法的可信度，本文设定了6个实验组，每组分别计算只使用卡尔曼滤波、自适应滤波、基于GNSS质量评价函数的卡尔曼滤波和使用基于GNSS质量评价函数的自适应卡尔曼滤波4种情况下的位置误差，通过对比分析可以验证本文选取的GNSS质量评价函数对于GNSS/INS松组合有一定程度的提升。

（下转第120页）