

Ю. Л. ФАИВУЖИНСКИЙ

ВОПРОСЫ ОПТИМИЗАЦИИ
АВТОМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ
ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Использование существующих автоматических инженерно-геодезических измерительных систем (ИГИС) и приборов в тех областях, где возникают повышенные требования к оперативности геодезических измерений, например при высокондустриальных

способах строительства, встречает ряд трудностей. В этой связи особую актуальность приобретает проблема разработки вопросов теории автоматических ИГИС соответствующего класса, отдельные аспекты которой изложены ниже.

По нашему мнению, для успешного синтеза эффективных и оптимальных ИГИС необходимо установить:

особенности измерений, влияющие на построение ИГИС;
критерий оптимальности ИГИС;

характеристики измеряемых сигналов, необходимые для расчета и оптимизации автоматической ИГИС;

методы оптимизации ИГИС по выбранному критерию.

Полученные с помощью традиционных геодезических приборов и приспособлений, таких, как теодолиты, нивелиры, дальномеры, мерные ленты и др., результаты разных видов измерений (например, расстояние по створу, превышение, горизонтальный угол) затем обрабатываются вручную. Процесс обработки непосредственно не связан с процессом измерений. В отличие от этого автоматические ИГИС должны осуществлять все необходимые виды измерений и обработку практически параллельно во времени. Схема ИГИС будет содержать как «канальные» блоки, раздельно обрабатывающие информацию каждого вида измерений, так и общие блоки, обрабатывающие данные разных видов измерений совместно.

Наибольшую эффективность от применения автоматических ИГИС следует ожидать при геодезическом обеспечении скоростных и во многом автоматизированных строительных процессов, таких, как щитовая проходка и продавливание тоннелей, рытье траншей, прокладка кабелей, планировочные, дорожно-строительные, дренажные и мелиоративные работы, строительство в скользящей опалубке, слежение за деформациями, монтаж строительных конструкций промышленными роботами-манипуляторами и ряд других, в основном непрерывных, строительных работ. Специфика геодезических измерений при таких работах заключается в том, что требуется оперативно определять пространственное положение перемещающихся объектов — рабочего органа строительных машин, устанавливаемой в проектное положение строительной конструкции, щита скользящей опалубки и т. п. Вследствие воздействия многих факторов на процессы перемещения измеряемый геометрический параметр претерпевает случайные изменения, т. е. является случайной функцией времени:

$y_k = y_k(t)$, где k обозначает вид измерения.

Так как ИГИС преобразует непрерывные входные сигналы в соответствующие выходные, ее можно рассматривать как систему автоматического управления САУ [3]. При поступлении на вход такой системы случайной функции $y_k(t)$ в ней наступает неуставновившийся режим измерений, при котором не успевают завершиться переходные процессы от каждого текущего случайного по значению и времени изменения $y_k(t)$. Полученные искажения выходного сигнала фактически представляют собой динамическую ошибку ИГИС за счет ее инерционных свойств.

Наряду с полезным сигналом $y_k(t)$ в ИГИС поступают проявляющие себя как помеха $n_k(t)$ различные возмущающие воздействия, вызванные, например, дифракцией визирного луча или лазерного пучка, неточностью установки прибора и его нагревом, ошибкой визирования, условиями конвекции воздуха и др. Они вызывают статическую ошибку ИГИС, которая имеет место и при геодезических измерениях неподвижных объектов. Суммарная ошибка ИГИС определяется совместным воздействием статической и динамической ошибок. Тогда проблему синтеза оптимальной ИГИС можно сформулировать как задачу построения системы, с минимальной суммарной ошибкой обрабатывающей входные сигналы в условиях воздействия на систему помех.

Исходя из решаемых ИГИС задач, основным критерием оптимальности следует выбрать минимум средней квадратической ошибки, нашедшей широкое распространение в качестве оценки суммарной ошибки в геодезии [1]. Учитывая непрерывность и предполагая эргодичность функции $y_k(t)$, при анализе системы удобно использовать интегральную по времени среднюю квадратическую ошибку. Построение линейной многокоординатной ИГИС, осуществляющей несколько видов измерений, можновести путем ее оптимизации по каждому виду измерений и последующего синтеза общей системы методами суперпозиции. Тогда для средней квадратической ошибки ε_k можно записать [4]:

$$\varepsilon_k = \varepsilon_k(W_k, S_{y_k}, S_{N_k}), \quad (1)$$

где $W_k = W_k(i\omega)$ — передаточная функция разомкнутой ИГИС по k -му виду измерений (i — мнимая единица, ω — текущая круговая частота); $S_{y_k} = S_{y_k}(\omega)$, $S_{N_k} = S_{N_k}(\omega)$ — спектральные плотности сигнала $y_k(t)$ и помехи $n_k(t)$.

Задача оптимизации ИГИС сводится к поиску такой W_k , которая минимизирует ε_k при известных спектральных плотностях S_{y_k} и S_{N_k} (или связанных с ним Фурье-преобразованием корреляционных функций). Спектральные плотности входных сигналов и помех ИГИС можно получить опытным или расчетным путем. Покажем порядок их определения на примере измерения линейных и угловых величин, описывающих пространственное расположение устанавливаемой в проектное положение строительной конструкции.

Отдельные реализации функции $y_k(t)$ рассматриваемого процесса могут значительно отличаться одна от другой, а сама функция $y_k(t)$ характеризуется непредсказуемым математическим ожиданием и очень большой дисперсией, поэтому считать ее стационарной нельзя. Однако из условий перемещения конструкции при монтаже можно допустить, что интервалы времени плавного изменения $y_k(t)$ значительно дольше моментов, связанных с ускорениями. Поэтому функцию $y_k(t)$ можно с достаточной степенью точности заменить ломано-линейной функцией $Y_k(t)$ (рисунок). Рассмотрим функцию $\dot{y}_k(t) = (Y_k(t))_l' \approx (y_k(t))_l'$. Она представ-

ляет собой так называемый телеграфный сигнал с амплитудно-модулированными импульсами. Спектральная плотность ее [5]

$$S_{y_k} = a_k^2 \frac{2\mu_k}{\omega^2 + \mu_k^2}. \quad (2)$$

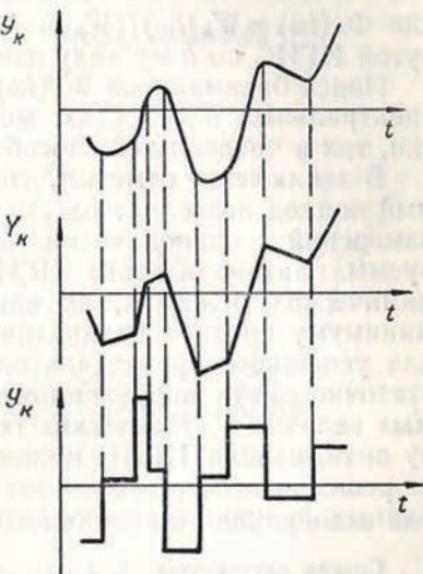
Здесь a_k — среднее значение скорости случайного процесса; $\mu_k = 1/\tau_k$, где τ_k — средняя длительность промежутка времени, когда скорость процесса практически неизменна.

Для каждого вида измерений a_k и τ_k можно определить экспериментально или рассчитать из известных условий перемещения объекта измерений. В нашем случае можно, например, предположить, что для поперечных смещений $a_{cm} = 10$ мм, $\tau_{cm} = 1$ с; для горизонтальных углов $a_{ry} = 0,8'$, $\tau_{ry} = 2$ с; для превышений $a_{np} = 3$ мм, $\tau_{np} = 0,5$ с. Тогда получим

$$S_{y_{cm}} = \frac{200}{\omega^2 + 1} \text{ мм}^2 \text{ с},$$

$$S_{y_{ry}} = \frac{0,64}{\omega^2 + 0,25} (\text{'})^2 \text{ с},$$

$$S_{y_{np}} = \frac{36}{\omega^2 + 4} \text{ мм}^2 \text{ с.}$$



Функция $y_k(t)$

Что касается помехи, то большое количество различных составляющих статической геодезической ошибки позволяет считать, что она обладает нормальным распределением. Тогда ее можно рассматривать как белый шум, спектральная плотность которого [4]

$$S_{N_k} = m_k^2, \quad (3)$$

где m_k — среднее квадратичное отклонение белого шума, т. е. статическая геодезическая ошибка.

Пусть, например, для поперечных смещений $m_{cm} = 3$ мм, для горизонтальных углов $m_{ry} = 0,5'$, для превышений $m_{np} = 2$ мм. Тогда

$$S_{N_{cm}} = 9 \text{ мм}^2, \quad S_{N_{ry}} = 0,25 (\text{'})^2, \quad S_{N_{np}} = 4 \text{ мм}^2.$$

После определения спектральных плотностей по отдельным видам измерений задачу оптимизации ИГИС можно вести методами, известными из теории случайных функций и теории автоматического управления. Так, для рассмотренного случая, когда известны спектральные плотности помехи и производной сигнала, общая формула (1) для ε_k имеет вид [2]:

$$\varepsilon_k^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left| \frac{1 - \Phi_k(i\omega)}{i\omega} \right|^2 \cdot S_{y_k}(\omega) d\omega + \frac{1}{2\pi} \times \\ \times \int_{-\infty}^{\infty} |\Phi_k(i\omega)|^2 \cdot S_{N_k}(\omega) d\omega, \quad (4)$$

где $\Phi_k(i\omega) = W_k(i\omega)/(W_k(i\omega) + 1)$ — передаточная функция замкнутой ИГИС по k -му виду измерений.

Поиск оптимальной $W_k(i\omega)$, минимизирующей ε_k при известных спектральных плотностях, может осуществляться как аналитически, так и численными способами.

В заключение отметим, что изложенный в статье информационный подход позволяет рассматривать все виды проводимых ИГИС измерений с единой точки зрения и вести оптимизацию проектируемых автоматических ИГИС, в том числе работающих в динамических режимах, по единому универсальному критерию — минимуму средней квадратической ошибки. Показано также, что для успешного проведения оптимизации ИГИС необходимо и достаточно знать корреляционные (по времени) свойства измеряемых величин и статических геодезических ошибок. При этом задачу оптимизации ИГИС можно формализовать настолько, что для ее решения можно воспользоваться идеями и методами теории случайных функций и теории автоматического управления.

Список литературы: 1. Большаков В. Д. Теория ошибок измерений с основами теории вероятностей. — М.: Недра, 1965. 2. Зайцев Г. Ф., Костюк В. И., Чинаев П. И. Основы автоматического управления и регулирования. — Киев: Техника, 1978. 3. Зацаринный А. В. Автоматизация высокоточных инженерно-геодезических измерений. — М.: Недра, 1976. 4. Пугачев В. С. Теория случайных функций. — М.: Физматгиз, 1962. 5. Соловьев В. В. Статистическая динамика линейных систем автоматического управления. — М.: Физматгиз, 1964.