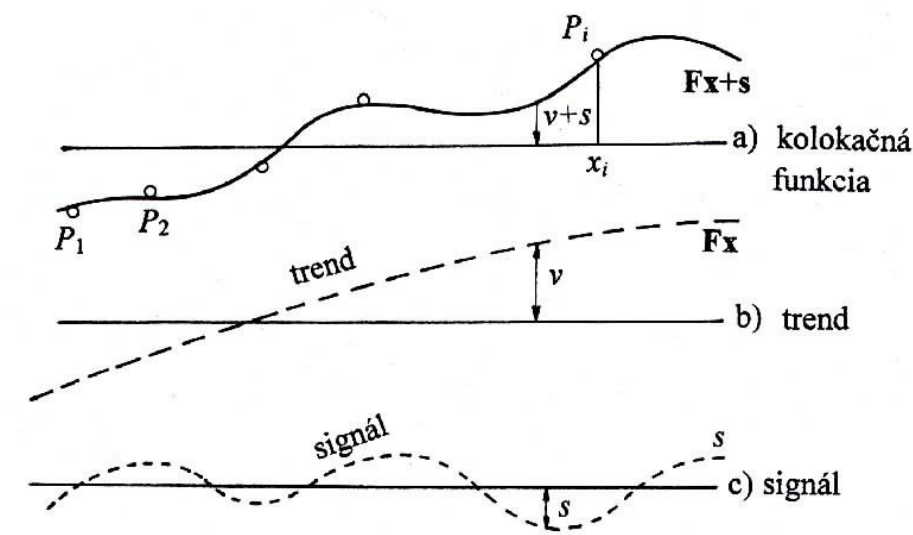


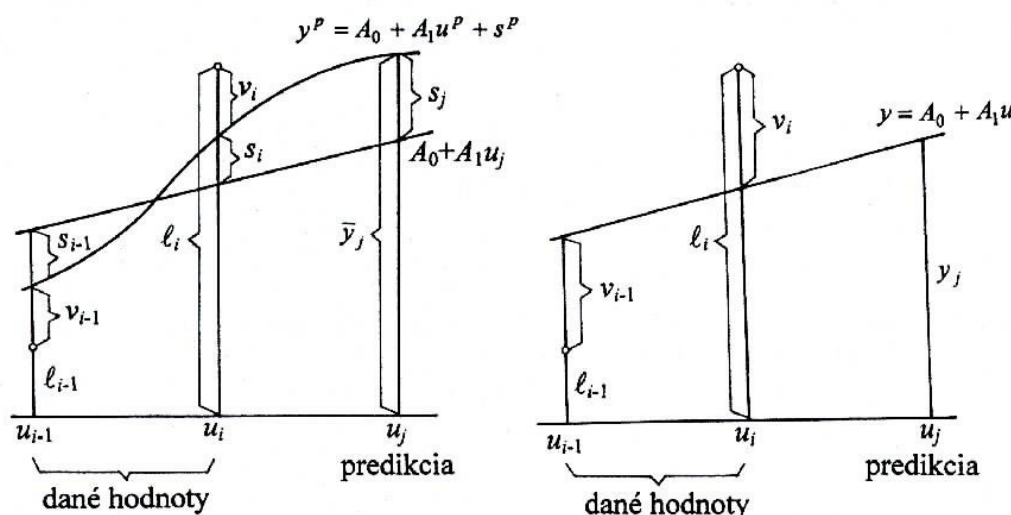
10. KOLOKÁCIA

Kolokácia je postup matematického spracovania meraní kombinovaný s jednotlivými postupmi, ktoré sú: filtrácia, vyrovnanie a predikcia. Kolokáciu môžeme aplikovať pri vyhodnocovaní rôznych geodetických meraní ako napr. pri regresnej analýze, družicových meraniach, transformácie súradníc a pod. Je to v prípadoch, keď merané údaje okrem chýb z merania obsahujú aj analytickou funkciou popísateľnú časť pravidelných systematických chýb a časť navzájom nezávislých nepravidelných systematických chýb (náhodného charakteru). Prejav prvej časti systematických chýb označujeme **trend** druhú časť označujeme **signál** (obr. 10.1).



Obr. 10.1. Geometrická interpretácia kolokácie

Pri kolokácii si kladieme za úlohu vyrovnať údaje na odmeraných bodoch a tiež určiť údaje na nameraných a mimoležiacich bodoch, tzv. interpolačných bodoch. Pri tom je dôležité vylúčiť (filtrovať) odmerané údaje, ktoré nepatria do základného súboru meraní. Z ostávajúcej vzorky odmeraných údajov vypočítame konštanty funkcie trendu vyrovnaním a napokon na základe funkcie trendu a korelačného vzťahu medzi nepravidelnými systematickými chybami interpoláciou určíme vektor hodnôt kolokačnej funkcie. Tento úkon označujeme **predikcia**.



Obr. 10.2. Porovnanie kolokácie a MNŠ

Na obr. 10.2 je porovnanie vyrovnanie metódou kolokácie a MNŠ.

Máme daných n odmeraných oporných hodnôt $\ell_1, \ell_2, \dots, \ell_n$ v oporných bodoch u_1, u_2, \dots, u_n . Odmerané hodnoty obsahujú časť pravidelných systematických chýb (trend) a časť nepravidelných systematických chýb (signál). V maticovom zápise trend spolu s meračskými chybami označíme $\mathbf{F}\mathbf{x} + \mathbf{v}$ a signál \mathbf{s} . Vektor meraní na oporných bodoch označíme $\boldsymbol{\ell}_{(i,n)}^T = [\ell_1, \ell_2, \dots, \ell_n]$. Pretvorené podmienkové rovnice majú tvar

$$\mathbf{v} = \mathbf{F}\mathbf{x} + \mathbf{s} - \boldsymbol{\ell}. \quad (10.1)$$

Keď za trend zvolíme polynóm $(k-1)$ stupňa meranej veličiny u_i ($i = 1, n$): $A_0 + A_1 u_i + A_2 u_i^2 + \dots + A_{k-1} u_i^{(k-1)}$, bude matica koeficientov neznámych

$$\mathbf{F}_{(n,k)} = \begin{bmatrix} 1 & u_1 & u_1^2 & \dots & u_1^{(k-1)} \\ 1 & u_2 & u_2^2 & \dots & u_2^{(k-1)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & u_n & u_n^2 & \dots & u_n^{(k-1)} \end{bmatrix}, \quad (10.2)$$

transformovaný vektor neznámych

$$\mathbf{x}_{(1,k)}^T = [A_0 \quad A_1 \quad A_2 \quad \dots \quad A_{k-1}], \quad (10.3)$$

vektor opráv \mathbf{v}

$$\mathbf{v}_{(1,n)}^T = [v_1 \quad v_2 \quad \dots \quad v_n], \quad (10.4)$$

vektor signálu \mathbf{s}

$$\mathbf{s}_{(1,n)}^T = [s_1 \quad s_2 \quad \dots \quad s_n], \quad (10.5)$$

vstupná váhová matica $\mathbf{P} = \mathbf{Q}^{-1}$,

$$\mathbf{P}_{(n,n)} = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \sigma_2^2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \sigma_n \end{bmatrix}. \quad (10.6)$$

Ďalej označíme vektor hodnôt kolokačnej funkcie

$$\mathbf{y} = \boldsymbol{\ell} + \mathbf{v} = \mathbf{F}\mathbf{x} + \mathbf{s} \quad (10.7)$$

Predikované hodnoty na iných ako oporných bodoch určíme z funkcie

$$\mathbf{y}^p = \mathbf{F}^p \mathbf{x} + \mathbf{s}^p, \quad (10.8)$$

kde vektor hodnôt vyrovnávacej kolokačnej funkcie je

$$\mathbf{y}_{(1,m)}^p = [y_1^p \quad y_2^p \quad \dots \quad y_m^p]^T, \quad (10.9)$$

v m predikovaných oporných bodoch s hodnotami

$$u_1^p, u_2^p, \dots, u_m^p \quad (10.10)$$

s maticou koeficientov u neznámych \mathbf{F}^p

$$\mathbf{F}_{(m,k)}^p = \begin{bmatrix} 1 & u_1^p & u_1^{p(2)} & \dots & u_1^{p(k-1)} \\ 1 & u_2^p & u_2^{p(2)} & \dots & u_2^{p(k-1)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & u_m^p & u_m^{p(2)} & \dots & u_m^{p(k-1)} \end{bmatrix}, \quad (10.11)$$

a signály

$$\mathbf{s}_{(1,m)}^p = \begin{bmatrix} s_1^p & s_2^p & \dots & s_m^p \end{bmatrix}^T. \quad (10.12)$$

Úplný vektor opráv bude obsahovať opravy a signály na oporných bodoch a predikovaných bodoch

$$\mathbf{v}^{*T} = \begin{bmatrix} \mathbf{v}^T & \mathbf{s}^T & \mathbf{s}^{pT} \end{bmatrix}. \quad (10.13)$$

K vektoru \mathbf{v}^* zavedieme maticu \mathbf{B} , ktorá vyjadrí požiadavky na vyrovnanie jednotlivých zložiek (opráv, signálov)

$$\mathbf{B}^T = \begin{bmatrix} -\mathbf{E} & \mathbf{E} & \mathbf{0} \end{bmatrix}, \quad (10.14)$$

kde \mathbf{E} je jednotková matica, a $\mathbf{0}$ je matica so samými nulami. Do matice \mathbf{B}^T sme zaviedli zápornú jednotkovú maticu za účelom úpravy záporného znamienka vektora opráv \mathbf{v}^* v rovnici (10.16).

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & \dots & 0 & 1 & 0 \dots 0 & 0 & 0 \dots 0 \\ 0 & -1 & \dots & 0 & 0 & 1 \dots 0 & 0 & 0 \dots 0 \\ & & \ddots & & & & & \\ 0 & 0 & \dots & 1 & 0 & 0 \dots 1 & 0 & 0 \dots 0 \end{bmatrix}. \quad (10.15)$$

Rovnicu (10.1) vyrovnáme postupom vyrovňania s parametrami v tvare

$$\mathbf{B}^T \mathbf{v}^* - \ell + \mathbf{F} \mathbf{x} = 0. \quad (10.16)$$

Rovnica (10.16) je vedľajšou podmienkou pri hľadaní minima funkcie

$$\mathbf{v}^{*T} \mathbf{P} \mathbf{v}^* = \mathbf{v}^{*T} \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{v}^* = \min. \quad (10.17)$$

V hlavnej podmienke (10.17) má matica \mathbf{Q} členy

$$\mathbf{Q}_{(3,3)} = \begin{bmatrix} \mathcal{Q}_\ell & 0 & 0 \\ 0 & \mathcal{Q}_s & \mathcal{Q}_{ss_p} \\ 0 & \mathcal{Q}_{s_p s} & \mathcal{Q}_{s_p} \end{bmatrix}. \quad (10.18)$$

Členy matice (10.18) sa určujú separátne, čo je uvedené neskôr.

Funkciu minima (10.17) určíme Langrangeovým postupom s využitím korelát

$$\mathbf{k}^T = \begin{bmatrix} k_1 & k_2 & \dots & k_n \end{bmatrix}. \quad (10.19)$$

$$\Omega = \mathbf{v}^{*T} \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{v}^* - 2\mathbf{k}^T (\mathbf{B}^T \mathbf{v}^* - \ell + \mathbf{F} \mathbf{x}) = \min. \quad (10.20)$$

Rovnicu (10.20) parciálne derivujeme podľa premenných \mathbf{v}^* a \mathbf{x}

$$\frac{\partial \Omega}{\partial \mathbf{v}^*} = 2\mathbf{Q}^{-1} \mathbf{v}^* - 2\mathbf{k}^T \mathbf{B}^T = \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{v}^* - \mathbf{B} \mathbf{k} = 0, \quad (10.21)$$

$$\frac{\partial \Omega}{\partial \mathbf{x}} = -2\mathbf{k}^T \mathbf{F} = \mathbf{F}^T \mathbf{k} = 0. \quad (10.22)$$

Z rovnice (10.21) vypočítame vektor \mathbf{v}^*

$$\mathbf{v}^* = \begin{bmatrix} \mathbf{v} \\ \mathbf{s} \\ \mathbf{s}_p \end{bmatrix} = \mathbf{Q} \mathbf{B} \mathbf{k} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_\ell & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{Q}_s & \mathbf{Q}_{ss_p} \\ 0 & \mathbf{Q}_{s_p s} & \mathbf{Q}_{s_p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\mathbf{E} \\ \mathbf{E} \\ 0 \end{bmatrix} \mathbf{k} = \begin{bmatrix} -\mathbf{Q}_\ell \\ \mathbf{Q}_s \\ \mathbf{Q}_{s_p s} \end{bmatrix} \mathbf{k}. \quad (10.23)$$

Do rovnice (10.16) namiesto \mathbf{v}^* dosadíme $\mathbf{Q} \mathbf{B} \mathbf{k}$ a napíšeme rovnicu (10.22)

$$\mathbf{B}^T \mathbf{Q} \mathbf{B} \mathbf{k} + \mathbf{F} \mathbf{x} - \ell = 0, \quad (10.24)$$

$$\mathbf{F}^T \mathbf{k} = 0.$$

V prvej rovnici (10.24) upravíme $\mathbf{B}^T \mathbf{Q} \mathbf{B}$

$$\mathbf{B}^T \mathbf{Q} \mathbf{B} = \begin{bmatrix} -\mathbf{E} & \mathbf{E} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_\ell & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{Q}_s & \mathbf{Q}_{ss_p} \\ 0 & \mathbf{Q}_{s_p s} & \mathbf{Q}_{s_p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\mathbf{E} \\ \mathbf{E} \\ 0 \end{bmatrix} = \mathbf{Q}_\ell + \mathbf{Q}_s = \mathbf{Q}_y \quad (10.25)$$

a dostaneme systém normálnych rovníc

$$\mathbf{Q}_y \mathbf{k} + \mathbf{F} \mathbf{x} - \ell = 0, \quad (10.26)$$

$$\mathbf{F}^T \mathbf{k} = 0.$$

Riešením rovníc (10.26) vypočítame neznáme \mathbf{x} a \mathbf{k}

$$\mathbf{k} = \mathbf{Q}_y^{-1} \ell - \mathbf{Q}_y^{-1} \mathbf{F} \mathbf{x} = \mathbf{Q}_y^{-1} (\ell - \mathbf{F} \mathbf{x}). \quad (10.27)$$

Vektor korelát \mathbf{k} dosadíme do druhej rovnice (10.26) a vypočítame \mathbf{x}

$$\mathbf{F}^T \mathbf{k} = \mathbf{F}^T (\mathbf{Q}_y^{-1} \ell - \mathbf{Q}_y^{-1} \mathbf{F} \mathbf{x}) = \mathbf{F}^T \mathbf{Q}_y^{-1} \ell - \mathbf{F}^T \mathbf{Q}_y^{-1} \mathbf{F} \mathbf{x} = 0$$

$$\mathbf{x} = (\mathbf{F}^T \mathbf{Q}_y^{-1} \mathbf{F})^{-1} \mathbf{F}^T \mathbf{Q}_y^{-1} \ell. \quad (10.28)$$

Opravy \mathbf{v} , signály \mathbf{s} a predikovaný signál \mathbf{s}^p vypočítame z rovníc (10.23)

$$\mathbf{v} = -\mathbf{Q}_\ell \mathbf{k} = -\mathbf{Q}_\ell \mathbf{Q}_y^{-1} (\ell - \mathbf{F} \mathbf{x}),$$

$$\mathbf{s} = \mathbf{Q}_s \mathbf{k} = \mathbf{Q}_s \mathbf{Q}_y^{-1} (\ell - \mathbf{F} \mathbf{x}), \quad (10.29)$$

$$\mathbf{s}^p = \mathbf{Q}_{s_p s} \mathbf{k} = \mathbf{Q}_{s_p s} \mathbf{Q}_y^{-1} (\ell - \mathbf{F} \mathbf{x}).$$

Vypočítané hodnoty v rovniciach (10.29) použijeme na výpočet vyrovnaných hodnôt v rovnici (10.7)

$$\mathbf{y} = \ell + \mathbf{v} = \mathbf{F} \mathbf{x} + \mathbf{s}$$

a predikovaných hodnôt v rovnici (10.8)

$$\mathbf{y}^p = \mathbf{F}^p \mathbf{x} + \mathbf{s}^p$$

Výpočet stredných chýb

Jednotkovú strednú chybu m_0 vypočítame zo vzťahu

$$m_0 = \sqrt{\frac{\mathbf{v}^* \mathbf{P} \mathbf{v}^*}{n-k}}. \quad (10.30)$$

$\mathbf{P} = \mathbf{Q}_y^{-1}$ a podľa rovnice (10.13) čitateľ v rovnici (10.30) bude iba pre merané hodnoty (vektor predikovaných signálov nebude zahrnutý)

$$\mathbf{v}^* \mathbf{Q}_y^{-1} \mathbf{v}^* = (\mathbf{v}^T - \mathbf{s}^T) \mathbf{Q}_y^{-1} (\mathbf{v} - \mathbf{s}). \quad (10.31)$$

V jednotkovej strednej chybe sú zahrnuté zložky zvyškových chýb ako aj signálu. Vzťah medzi kovariančnou maticou \mathbf{C} a maticou váhových koeficientov \mathbf{Q} (10.25) ako aj pre prvky týchto matíc vyjadrujú rovnice

$$\mathbf{C}_\ell = m_0^2 \mathbf{Q}_\ell, \quad \mathbf{C}_s = m_0^2 \mathbf{Q}_s \quad (10.32)$$

$$\sigma_i^2 = m_0^2 q_{\ell_i \ell_i}, \quad \sigma_{s_i s_i}^2 = m_0^2 q_{s_i s_i}, \quad \sigma_i \sigma_k = m_0^2 q_{s_i s_k}, \quad (10.33)$$

kde $\sigma_i \sigma_k$ sú kovariancie a i vyjadruje poradie riadku a k poradie stĺpca v matici (10.35),

\mathbf{C}_ℓ je vstupná kovariačná matica odmeraných hodnôt ℓ_i na oporných bodoch

$$\mathbf{Q}_{\ell(n,n)} = \begin{vmatrix} \sigma_1^2 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \sigma_2^2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \sigma_n^2 \end{vmatrix}. \quad (10.34)$$

Kovariančná matica signálu na oporných bodoch je

$$\mathbf{Q}_{s(n,n)} = \begin{vmatrix} \sigma_{s1}^2 & \sigma_{s1} \sigma_{s2} & \sigma_{s1} \sigma_{s3} \dots & \sigma_{s1} \sigma_{sn} \\ \sigma_{s2} \sigma_{s1} & \sigma_{s2}^2 & \sigma_{s2} \sigma_{s3} \dots & \sigma_{s2} \sigma_{sn} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{sn} \sigma_{s1} & \sigma_{sn} \sigma_{s2} & \sigma_{sn} \sigma_{s3} \dots & \sigma_{sn}^2 \end{vmatrix}. \quad (10.35)$$

Kovariančná matica signálu na predikovaných bodoch je

$$\mathbf{Q}_{s_p s(m,m)} = \begin{vmatrix} \sigma_{s1}^p \sigma_{s1} & \sigma_{s1}^p \sigma_{s2} & \sigma_{s1}^p \sigma_{s3} \dots & \sigma_{s1}^p \sigma_{sm} \\ \sigma_{s2}^p \sigma_{s1} & \sigma_{s2}^p \sigma_{s2} & \sigma_{s2}^p \sigma_{s3} \dots & \sigma_{s2}^p \sigma_{sm} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{sm}^p \sigma_{s1} & \sigma_{sm}^p \sigma_{s2} & \sigma_{sm}^p \sigma_{s3} & \sigma_{sm}^p \sigma_{sm} \end{vmatrix}. \quad (10.36)$$

Úplná kovariančná matica \mathbf{Q}_y sa vypočíta podľa rovnice (10.25)

$$\mathbf{Q}_y = \mathbf{Q}_\ell + \mathbf{Q}_s.$$

Kovariančnú maticu neznámych \mathbf{x} určíme podľa zákona o hromadení váh podľa schémy $\mathbf{Q}_F = \mathbf{A} \mathbf{P}^{-1} \mathbf{A}^T$, keď platí $(\mathbf{A}^T)^{-1} = (\mathbf{A}^{-1})^T$

$$\mathbf{x} = (\mathbf{F}^T \mathbf{Q}_y^{-1} \mathbf{F})^{-1} \mathbf{F}^T \mathbf{Q}_y^{-1} \ell.$$

$$\mathbf{Q}_x = (\mathbf{F}^T \mathbf{Q}_y^{-1} \mathbf{F})^{-1} \mathbf{F}^T \mathbf{Q}_y^{-1} \mathbf{Q}_y ((\mathbf{F}^T \mathbf{Q}_y^{-1} \mathbf{F})^{-1} \mathbf{F}^T \mathbf{Q}_y^{-1})^T =$$

$$= \underbrace{(\mathbf{F}^T \mathbf{Q}_y^{-1} \mathbf{F})^{-1} \mathbf{F}^T \mathbf{Q}_y^{-1} \mathbf{Q}_y \mathbf{Q}_y^{-1} \mathbf{F} (\mathbf{F}^T \mathbf{Q}_y^{-1} \mathbf{F})^{-1}}_{\mathbf{I}} = (\mathbf{F}^T \mathbf{Q}_y^{-1} \mathbf{F})^{-1}. \quad (10.37)$$

Stredné chyby jednotlivých meraných veličín vektora $\mathbf{x}^T = (x = A_0, y = A_1, \dots, w = A_{k-1})$ vypočítame zo vzťahu

$$m_{A_0} = m_x = m_0 \sqrt{Q_{xx}}, \quad m_{A_1} = m_y = m_0 \sqrt{Q_{yy}}, \dots \quad (10.38)$$

keď sa váhové koeficienty Q_{xx}, Q_{yy}, \dots nachádzajú na hlavnej diagonále váhovej matice \mathbf{Q}_x (10.37).

Kovariančné funkcie

V kovariančných maticiach (10.35) a (10.36) vystupujú kovariančné funkcie vo forme variancií (napr. σ_{si}^2) a vo forme kovariancií (napr. σ_{si}, σ_{sj}). Vstupná matica \mathbf{Q}_ℓ obsahuje variancie (štvorce stredných chýb) meraní. Prvky matíc \mathbf{Q}_s a \mathbf{Q}_{sp} je potrebné pred vyrovnaním vypočítať. \mathbf{Q}_s popisuje štatistické vlastnosti signálu na oporných bodoch \mathbf{Q}_{sp} na predikovaných bodoch.

Na určené kovariancie sa volí kovariančná funkcia, ktorá má vlastnosť slabnutia signálu s narastajúcou vzdialenosťou. Vhodná je niektorá z expomenciálnych funkcií, napr.

$$\sigma_i \sigma_j = C_{ij} = C_0 e^{-a^2 d_{ij}^2}, \quad (i, j = 1, 2, \dots, n), \quad (10.39)$$

s parametrami C_0 a a , kde C_0 charakterizuje varianciu signálu na každom bode a určuje tlmenie korelačného vzťahu v závislosti na vzdialenosti d dvoch susedných bodov.

Príklad na výpočet variancií a kovariancií

Máme daných 5 meraní ℓ_i v bodoch u_i , kde $i = 1, 2, \dots, 5$. Určíme prvky matíc \mathbf{Q}_s a \mathbf{Q}_{sp} pomocou kolokačnej funkcie (10.39) v bodoch u_j^P ($j = 1, \dots, 4$).

u_i	0,000	1,445	2,890	4,335	5,780
ℓ_i	0,611	1,086	2,903	4,592	6,271
u_j^P	0,722	2,168	3,612	5,058	

Trend budeme voliť v tvare priamky $A_0 + A_1 u$. Pre kovariančnú funkciu (10.39) boli zvolené konštanty $C_0 = 0,252$, $a = 0,6$. Odhadnutá stredná chyba merania je $m_\ell^2 = 0,1$. Vstupné kovariančné matice budú:

$$\mathbf{Q}_\ell = \begin{vmatrix} 0,1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,1 \end{vmatrix},$$

$$\mathbf{Q}_s = \begin{vmatrix} \sigma_{s1}^2 & \sigma_{s1}\sigma_{s2} & \dots & \sigma_{s1}\sigma_{sn} \\ \sigma_{s2}\sigma_{s1} & \sigma_{s2}^2 & \dots & \sigma_{s2}\sigma_{sn} \\ \vdots & & & \\ \sigma_{sn}\sigma_{s1} & \sigma_{sn}\sigma_{s2} & \dots & \sigma_{sn}^2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0,252 & 0,119 & 0,012 & 0 & 0 \\ 0,119 & 0,252 & 0,119 & 0,012 & 0 \\ 0,012 & 0,119 & 0,252 & 0,119 & 0,012 \\ 0 & 0,012 & 0,119 & 0,252 & 0,119 \\ 0 & 0 & 0,012 & 0,119 & 0,252 \end{vmatrix},$$

$$\mathbf{Q}_{sp} = \begin{vmatrix} \sigma_{s1}^p\sigma_{s1} & \sigma_{s1}^p\sigma_{s2} & \dots & \sigma_{s1}^p\sigma_{sn} \\ \sigma_{s2}^p\sigma_{s1} & \sigma_{s2}^p\sigma_{s2} & \dots & \sigma_{s2}^p\sigma_{sn} \\ \vdots & & & \\ \sigma_{sn}^p\sigma_{s1} & \sigma_{sn}^p\sigma_{s2} & \dots & \sigma_{sn}^p\sigma_{sn} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0,209 & 0,209 & 0,046 & 0,002 & 0 \\ 0,046 & 0,209 & 0,209 & 0,046 & 0,002 \\ 0,002 & 0,046 & 0,209 & 0,209 & 0,046 \\ 0 & 0,002 & 0,046 & 0,209 & 0,209 \end{vmatrix}.$$

Jednotlivé prvky matíc \mathbf{Q}_s a \mathbf{Q}_{sp} vypočítame nasledovne:

$$\begin{aligned} \sigma_{s1}^2 &= \sigma_{s2}^2 = \dots = \sigma_{si}^2 = \dots = \sigma_{sn}^2 = C_0 e^{-a^2 d_i^2} = 0,252 e^{-0,6^2(0,-0.)^2} = 0,252, \\ d_i &= (u_i - u_i) = 0, \quad (i = 1, n) \\ \sigma_{s1}\sigma_{s2} &= C_0 e^{-a^2(u_1 - u_2)^2} = 0,252 e^{-0,6^2(0,-0,445)^2} = 0,119, \quad r_i = (u_1 - u_i), \quad (i = 2, n), \\ &\vdots \\ \sigma_{s1}^p\sigma_{s1} &= C_0 e^{-a^2(u_1 - u_1^p)^2} = 0,252 e^{-0,6^2(0,-0,722)^2} = 0,209, \quad t_i = (u_1 - u_i^p), \quad (i = 1, m). \\ &\vdots \end{aligned}$$