

VLADIMÍR HAŠEK—PAVEL MATULA—
KAREL SEGETH—JANA VIGNATIOVÁ

POUŽITÍ VÝPOČETNÍ TECHNIKY PŘI STROJOVÉM ZPRACOVÁNÍ GEOFYZIKÁLNÍCH DAT V ARCHEOLOGII

Archeologická prospekce při rozsáhlých předstihových a záchranných výzkumech stále nabývá většího ekonomického i odborného významu. V posledním desetiletí se v Československu stále prohlubuje a vzrůstá spolupráce mezi archeologickými pracovišti (AÚ ČSAV, AÚ SAV, katedry archeologie, centrální i regionální muzea, střediska památkové péče a ochrany přírody) a pracovišti geofyzikálními (n. p. Geofyzika, fakulty přírodních věd, Vysoká škola báňská a d.) v oblasti využití geomagnetických a geoelektrických měření pro identifikaci archeologických objektů v terénu.¹ Součinnost těchto institucí a jejich výzkumných úkolů byla již zakotvena v ustavení Interdisciplinárních racionálních brigád a výsledky jejich činnosti přinesly řadu úspěšných závěrů jak po stránce metodické, tak vědecké.² Dalším krokem k získání kvantitativně i kvalitativně bohatších hodnot informací je použití výpočetní techniky při strojovém zpracování geofyzikálních dat, získaných na jednotlivých archeologických lokalitách.

Náš stručný příspěvek informuje o vyhodnocení těchto dat ze dvou nedávno zkoumaných lokalit: 1. Brna — Stránské skály a 2. Hrádku u Morkůvek.

1. **Brno — Stránská skála** (okr. Brno-Město), výzkum Muzea města Brna 1981 (ved. dr. J. Čižmářová), geomagnetický průzkum n. p. Geofyzika Brno. Při stavbě vodovodu byl na této lokalitě nalezen poměrně rozměrný sídlištní objekt kultury s nálevkovitými poháry. Při jeho výzkumu bylo zjištěno, že se jednalo o objekt dílenského charakteru, související se zpracováním suroviny pro výrobu štípané industrie, která zde byla těžena. Projektované geofyzikální měření mělo za úkol vysledovat

¹ Sborník 1. celostátní konference „Uplatnění geofyzikálních metod v archeologii“, Petrov n. Desnou 1979.

² V. Hašek—Z. Měřinský—J. Unger—J. Vignatiová, Výsledky geofyziky v archeologickém výzkumu a průzkumu na Moravě v letech 1979—1982 a jejich metodický přínos; Sborník 4. celostátního symposia „Geofyzika a archeologie“, Liblice 1982, Praha 1983, 141—153.

další sídlištní objekty a pokusit se stanovit půdorysné uspořádání sídliště.³ Bylo zpracováno podle magnetometrických dat — data A (tab. A:1). Obsahovala 36×51 hodnot a_{ij} ; $i = 1 \dots, 36$; $j = 1 \dots, 51$; měřených ve čtvercové síti o straně 2 m. Naměřené hodnoty se pohybovaly v rozsahu asi od -100 do $+30$ nT.

2. **Hrádek u Morkúvek** (okr. Břeclav), výzkum Regionálního muzea Mikulov 1982 (ved. dr. J. Unger), geomagnetický průzkum n. p. Geofyzika Brno. Pozdněhalštatské nevelké hrádisko jehož kruhový areál (o průměru přibližně 100 m) situovaný na nevýrazné ostrožně byl obklopen příkopem s vnějším valem; na přístupné straně byl příkop zdvojen. Archeologické sondy vedené nejvýraznějšími anomáliemi zachytily větší koncentraci mazanice, zahloubené obydlí, zásobnicovou jámu a mazanícovou vypálenou podlahu.⁴

Bylo zpracováno pole magnetometrických dat — data B (tab. A:2). Obsahovala 25×56 hodnot b_{ij} ; $i = 1 \dots, 27$; $j = 1 \dots, 56$; měřených ve čtvercové síti o straně 1 m. Naměřené hodnoty se pohybovaly v rozsahu asi od -100 do $+30$ nT.

POSTUP ZPRACOVÁNÍ

Obě pole dat byla zpracována stejným způsobem, který dále stručně popíšeme. Obecně budeme symbolem D značit libovolné pole dat d_{ij} .

Způsob zpracování byl motivován možností použít speciální hardware i software v LFA (Laboratorium für Feldarcheologie, Rheinisches Landesmuseum, Bonn, BRD). LFA je vybavena počítačem PDP 11 s rychlou pamětí velikosti asi 2,5 MB a 2 disky. Uživatelům je počítač přístupný prostřednictvím videoterminálů. Kromě magnetických pásek je počítač vybaven speciálními periferními zařízeními, jež slouží ke zpracování velkých polí dat, zejména obrazů. Jde především o barevnou obrazovku RAMTEK na výstupu, jež může zobrazit v 512×512 bodech na stínítku 256 odstínů šedi, nebo na ní lze pomocí software zobrazit odpovídající množství barevných odstínů. Další periferní zařízení nebyla pro zpracování použita; jde o černobílou obrazovku podobných kvalit, zařízení pro digitalizaci obrazů a zařízení pro zpětný záznam digitalizovaných obrazů na citlivý materiál.

Kromě běžného standartního software je na počítači k dispozici speciální původní software pro zpracování obrazů, které bylo navrženo a vyvíjeno v LFA.⁵ Jde zejména o programy pro filtraci dat a různé zobrazovací techniky umožňující názorný výstup výsledků na barevné obrazovce. Toto software v základním režimu zpracovává data, jež se skládají až z 512 řádek, každá řádka až z 512 hodnot.

3 Výroční zpráva úkolu „Podíl geofyzikálních metod při přípravě terénního archeologického výzkumu“ — etapa 1981, Geofyzika Brno, 1982, 13.

4 V. Hašek—Z. Měřínský—J. Unger—J. Vignatiová, Liblice 1982.

5 I. Scollar, Image processing via computer in aerial archaeology, *Computer & the Humanities* 11, 1977, 347—351; *týž*, Computer image processing for archaeological air photographs, *World Archaeology* 10, 1978, 71—87.

a) Data A i B byla nejprve transformována do rozsahu hodnot $0 \leq d'_{ij} \leq 254$, přičemž hodnotě $d_{ij} = 0$ odpovídá po transformaci hodnota $d'_{ij} = 127$. (Hodnoty pole vstupující do každého jednotlivého kroku zpracování budeme značit d_{ij} , hodnoty vystupující jako výsledek kroku budeme značit d'_{ij} .)

Příslušná nelineární transformace je tvaru

$$d'_{ij} = \frac{127}{\pi/2} \arctg \frac{d_{ij}}{S} + 127, \quad (1)$$

kde S je parametr, určující charakter výstupních dat. Transformace (1) v podstatě low-pass filter, který odstraní nejvyšší frekvence v rozsahu daném právě parametrem S . Tato transformace tak odstraní hrubé chyby měření (spikes) nebo aspoň zmírní jejich efekt. Čím větší je hodnota S , tím vyšší frekvence filtr propustí.

Pro praktické zpracování dat A i B se ukázala vhodná hodnota $S = 20$. Data B skutečně obsahovala několik chybně naměřených hodnot (spikes), jež byly krokem (a) odstraněny.

b) Data byla dále interpolována tak, aby v jejich každém řádku bylo právě 512 hodnot (v druhé variantě zpracování 402 hodnot), jak to vyžaduje software při zpracování obrazů. Interpolace (resampling) byla provedena pomocí bikubické spline aproximace funkce $\text{sinc } x = \sin x/x$,⁶ jež určuje hodnotu funkce v daném bodě pomocí hodnot v 16 bodech sousedních. V bodech u okraje pole (edge) bylo využito zrcadlového prodloužení dat vně pole. Použitá transformace byla navržena tak, aby co nejlépe zachovala frekvenční charakteristiku dat.

Po provedení tohoto kroku jsme obdrželi data A' s hodnotami a'_{ij} ; $i = 1, \dots, 358$; $j = 1, \dots, 512$; a data B' s hodnotami b'_{ij} ; $i = 1, \dots, 242$; $j = 1, \dots, 242$; $j = 1, \dots, 512$. O druhé variantě zpracování se zmíníme později. Povšimněme si, že data obsahují zřetelný trend, jenž byl právě v následujících krocích odstraněn.

Vlastní high-pass filtrace byla provedena v prostorové oblasti dvěma různými technikami, jež daly ekvivalentní výsledky.

c) Data byla filtrována pomocí Wallisova algoritmu⁷ pro zvýšení lokálního kontrastu a jasu obrazu. Princip transformace je vnutit — se zvolenou vahou α -datům zvolenou statistickou charakteristikou (mean m_d a standart deviation σ_d). Současně se dá řídit zvýšení kontrastu obrazu parametrem A . Zvolený mean a standart deviation se přitom porovnávají s lokálním mean a standart deviation dat v okně volitelných rozměrů. Obecně

$$d'_{ij} = \frac{A\sigma_d}{A\sigma_{ij} + \sigma_d} (d_{ij} - m_{ij}) + \alpha m_d + (1 - \alpha)m_{ij}, \quad (2)$$

6 R. Bernstein, Digital image processing of Earth observation sensor data, IBM J. Res. Develop. 20, 1976, 40—57, 300.

7 R. Wallis, An approach to the space variant restoration and enhancement of images, Proceedings Symposium on Current Mathematical Problems in Image Science, Monterey, Cal., 1976, 10—12; I. Scollar—B. Weidner—T. S. Huang, Image enhancement using the median and the interquartile distance, Computer Graphics Image Process., v tisku.

kde je $0 < \alpha < 1$, m_{ij} a σ_{ij} jsou lokální mean a standart deviation v okně. Čím větší je α , tím silnější je účinek filtru.

Program MVEQF, sestavený v LFA, přitom získává hodnoty m_{ij} a σ_{ij} při použití pouze poloviny bodů v okně, čímž se výpočet urychlí. Jako nejvhodnější se pro oboje data ukázalo okno 25×25 a požadované statistické charakteristiky $m_d = 127$ a $\sigma_d = 40$. Pro data A bylo dále užito hodnot $\alpha = 0.1$ a $A = 10$ a pro data B $\alpha = 0.3$, $A = 20$. Zpracování jedněch dat trvalo asi 40 s. Popsaný filtr tedy působí jako high-pass. Ve zpracování je skutečně zřetelné odstranění trendu. V některých částech obrazovky vystoupila jemná pravoúhlá struktura, jež je důsledkem interpolačního kroku (b).

d) Data byla filtrována pomocí algoritmu pro crispening (\sim zaostření).⁸ Princip transformace spočívá v odečtení — se zvolenou vahou α -lokálního mean dat v okně volitelných rozměrů od hodnoty ve středu okna. Obecně

$$d'_{ij} = w(d_{ij} - \alpha m_{ij}), \quad (3)$$

kde $0 < \alpha < 1$, m_{ij} je lokální mean a hodnota w je určována programem automaticky pro dosažení normalizace jasu obrazu. Čím větší je α , tím větší je crispening effect.

Program FILTER pro tuto transformaci byl rovněž sestaven v LFA. Pro oboje data se nejvhodnější ukázalo okno 25×25 . Pro data A bylo užito hodnoty $\alpha = 1/(1 + \log 1.7)$, pro data B hodnoty $\alpha = 1/(1 + \log 1.5)$. Zpracování jedněch dat trvalo asi 40 s. Popsaný filtr působí rovněž jako high-pass. Jeho účinek je velmi podobný účinku filtru (c), výsledný obraz je však daleko kontrastnější, což ubírá výsledkům na názornosti. Výsledky získané filtrem (d) jsou však v zásadě stejné jako při filtraci (c).

Poznamenejme ještě, že výsledky filtrace (c) i (d) jsou na okrajích vždy znehodnoceny, neboť se tam projevuje edge effect.

Druhá varianta zpracování probíhala velmi podobně. Transformace (a) byla provedena identicky jako v první variantě. V kroku (b) byla data interpolována jinak: v každém řádku bylo zapsáno 402 hodnot. Maximální využití obrazovky pro data je pak 402 řádků po 402 hodnotách; kolem dat je vlevo, nahoře a vpravo okraj šířky 55 řádků (nebo sloupců), který neobsahuje zpracovávanou informaci. Dolní okraj může být i širší než 55 řádků.

Kromě samotných dat je nyní možno na obrazovce zobrazit i další pomocnou informaci, jež činí obraz přehlednější.

Filtrace byla s těmito daty provedena přesně stejně jako jsme uvedli v (c) a (d).

Celkově lze říci, že zpracování uvedených dat A a B přineslo zajímavé výsledky. Část anomálií, které jsou patrné po provedení filtrace (c) nebo (d), není v původních datech pouhým okem patrna. High-pass filtrace, předcházená odstraněním spikes, se projevila velmi výrazně odstraněním trendu v datech. Filtrace byla založena na statistických principech a její realizace prostřednictvím algoritmů sestavených v LFA byla vcelku snad-

⁸ W. K. Pratt, *Digital Image Processing*, Wiley—New York, 1978; I. Scollar, B. Weidner, T. S. Huang, 1983.

ná i pro uživatele bez podrobné znalosti příslušného teoretického základu filtrů. Volitelné parametry filtrů mají celkem jednoduchý a názorný význam. Kromě toho poměrně velká rychlost filtrace a bezprostřední výstup výsledků na obrazovce dovoluji provést větší množství pokusů s různou volbou parametrů a vzájemně je porovnat. Jeden takový pokus trvá asi 40 s.

Vcelku se ukázalo, že filtrace pomocí algoritmu MVEQF dává příznivější výsledky, neboť program FILTER poskytuje výsledky s přehnaným kontrastem obrazu a tedy méně výrazné vzájemně blízké anomálie mohou být nerozlišeny.

Úspěch filtrace uvedeným způsobem v prostorové oblasti na rychlém speciálně vybaveném počítači v LFA neznamená zavržení jiných metod zpracování dat, zejména high-pass filtrace na středních univerzálních počítačích, jež jsou běžnému uživateli daleko snáze dostupné. Zde je možno s úspěchem pracovat s metodami filtrace ve wavenumber domain prostřednictvím fast Fourier transform.⁹ Výše uvedené filtrace (Wallisův algoritmus a algoritmus pro crispering) jsou používány v n. p. Geofyzika Brno na počítači HP 9845 S. Výsledky těchto filtrací jsou znázorněny graficky na platteru HP 9872 A pomocí izočar respektive pomocí axonometrických pohledů.

ARCHEOLOGICKÉ VYUŽITÍ

Uvedený teoretický rozbor vyhodnocení magnetometrických dat byl použit na dvou již výše uvedených archeologických lokalitách: Stránská skála (data A) a Hrádek u Morkůvek (data B). Zpracované hodnoty T se v obou případech pohybovaly v rozsahu -100 do $+30$ nT. Z výsledného zpracování dokumentovaného fotograficky z obrazovky počítače (tab. A:1, 2) vyplynulo:

Stránská skála (tab. A:1) — hodnoty magnetického pole klesají od severozápadu k jihovýchodu; tento charakter pole je přerušen pásmem intenzivních anomálií ΔT obojí polarity (přibližně ve směru západ—východ), což bylo způsobeno průběhem vodovodního potrubí. Další kladné anomálie lokálnějšího charakteru souvisejí pravděpodobně s rozmístěním archeologických objektů.

Hrádek u Morkůvek (tab. A:2) — z výsledného zpracování vystoupila výrazná pravoúhlá struktura lokálních maxim ΔT , která odpovídá patrně archeologicky zaznamatelnému objektu. Anomálie ΔT , jež protíná JV okraj snímku odpovídá příkopu.

⁹ V. Bezvoda—E. Jelínková—K. Segeth, Modern methods of the separation of regional and residual portions of potential fields, Acta Univ. Carolin. — Geologica, No. 1—2, 1980, 135—150; V. Bezvoda—V. Hašek—K. Segeth, Objektivní metody zpracování geofyzikálních dat v archeologii. Aplikace geofyzikálních metod v archeologii a moderní metody terénního výzkumu a dokumentace, Sborník 1. celostátní konference, Petrov n. D., 1979, 37—40; V. Bezvoda—K. Segeth, Directional and frequency filtering of geophysical data measured in a rectangular net, Gerlands Beiträge Geophys. 90, 1981, 133—146.

ПРИМЕНЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ ПРИ МАШИННОЙ ОБРАБОТКЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ В АРХЕОЛОГИИ

Статья посвящена новейшим методам оценки магнитометрических данных, получаемых из разнообразных археологических местонахождений при помощи специальных методов фильтрации (алгоритм Валлиса и алгоритм „pro crispening“) на автоматических вычислительных машинах. Сообщение приносит информацию об этом методе, проверяемом и применяемом в „LFA“ в Бонне на вычислительной машине „PDP 11“, а также о конкретных результатах применения этого метода, полученных на двух археологических местонахождениях в ЧССР (странска Скала, Градек у Мокривок).

ANWENDUNG DER COMPUTER-TECHNIK BEI DER BEARBEITUNG DER GEOPHYSIKALISCHEN DATEN IN DER ARCHÄOLOGIE

Der Beitrag ist den neuesten Methoden der Auswertung der magnetometrischen Daten gewidmet, die an verschiedenen archeologischen Lokalitäten erworben wurden. Bei der Verwendung vom Computer behilft man sich mit speziellen Filtrationsmethoden (der Wallische Algorithmus, Algorithmus für Crispening). Der Bericht bietet Informationen über diese Methode, die in LFA in Bonn bei der Verwendung vom PDP 11 — Computer entwickelt und überprüft wurde, und über konkrete Ergebnisse bei der Anwendung dieser Methode an zwei archeologischen Lokalitäten in der ČSSR (Stránská skála, Hrádek bei Morkůvky).