

JERZY BUTOWTT, JÓZEF SANECKI

Wojskowa Akademia Techniczna
Warszawa

WIELOPASMOWE ZBIERANIE I PRZETWARZANIE INFORMACJI O ŚRODOWISKU GEOGRAFICZNYM

WIELOPASMOWE ZBIERANIE INFORMACJI

Pod pojęciem wielopasmowego zbierania informacji należy rozumieć zdalne zbieranie informacji o środowisku w różnych zakresach widma promieniowania elektromagnetycznego, w takich zakresach, które mogą być obecnie rejestrowane z wykorzystaniem różnych detektorów. Rejestracja informacji o środowisku może się odbywać za pomocą technik obrazowych, jak również innych. W większości przypadków informacje o rozpatrywanym elemencie możemy przedstawić jako funkcję:

$$F = f(x, y, z, E, R, d, T, \varrho, \lambda) \quad (1)$$

gdzie:

- x, y, z — współrzędne położenia elementu,
- $E = f_1(\lambda)$ — spektralny rozkład źródła promieniowania elektromagnetycznego,
- $R = f_2(\lambda)$ — reemisyjne lub emisyjne właściwości danego elementu,
- $d = f_3(\lambda)$ — spektralna czułość użytego detektora,
- $T = f_4(\lambda)$ — spektralny rozkład transmisji użytego filtra oraz tłumienia atmosfery,
- $\varrho = f_5(\lambda)$ — przestrzenny rozkład właściwości reemisyjnych lub emisyjnych rozpatrywanego elementu,
- λ — długość fali użytego do detekcji promieniowania elektromagnetycznego.

Jak wynika z przedstawionego wzoru, informacja o elemencie zależy od wielu parametrów, często powiązanych ze sobą w trudny do określenia sposób. Pomijając współrzędne położenia badanego elementu (x, y, z), pozostałe parametry funkcji (1) należy rozpatrywać jako odrębne zagadnienie.

$E(\lambda)$ określa spektralny rozkład użytego (wykorzystanego) źródła promieniowania elektromagnetycznego. W przypadku potrzeb zdalnej detekcji może to być: słońce, źródło światła żarowego, anteny stacji radiolokacyjnej, promieniowanie własne rozpatrywanego elementu i inne. W konkretnych warunkach rozkład tego promieniowania może być dokładnie określony, chociaż jest on związany z wieloma czynnikami trudnymi do ścisłego matematycznego ujęcia. Parametr $R(\lambda)$ [$E(\lambda)$ — emisja], gdy mamy do czynienia z techniką obrazową, zawarty jest w zjawisku zaczernienia lub gęstości optycznej obrazu. W przypadku użycia jako detektora fotelementu mieści się w analizowanych parametrach elektrycznych. W sumie określa więc fizykochemiczne właściwości rozpatrywanego elementu. Dla danego elementu oraz odpowiedniego pasma detekcji parametr ten po odpowiednim zdefiniowaniu $E(\lambda)$, $\rho(\lambda)$, $d(\lambda)$ i $T(\lambda)$ może być ściśle ustalony. Wszystkie przedstawione parametry są funkcją długości fali wykorzystywanego promieniowania. Zakres promieniowania elektromagnetycznego, w którym prowadzona jest detekcja, ograniczony jest najniższym spośród przedziałów $E(\lambda)$, $d(\lambda)$, $T(\lambda)$.

Rozpatrując wzór (1) od strony praktycznej, wszystkie wymienione w nim parametry mogą być w odpowiedni sposób zmierzone. W dalszym ciągu, pomijając zagadnienia współrzędnych (x, y, z) , zasygnalizujemy sposób ustalenia wartości (rozkładu) poszczególnych parametrów wzoru (1). Określenia spektralnego rozkładu żarowego źródła promieniowania elektromagnetycznego $E(\lambda)$ dokonujemy matematycznie, posługując się wzorem Plancka z uwzględnieniem określonego współczynnika szarości. Praktycznie uzyskujemy go przez spektrofotometrowanie. Źródła krótkofalowego promieniowania elektromagnetycznego o nieciągłym widmie analizujemy za pomocą spektrofotometrowania, a źródła o większej długości fali opisujemy, posługując się parametrami elektrycznymi. Reemisyjne $R(\lambda)$ właściwości rozpatrywanego elementu otrzymujemy przez spektrofotometrowanie, natomiast emisyjne — sposobem matematycznym jako źródła promieniowania elektromagnetycznego lub przez spektrofotometrowanie.

Rozkład czułości spektralnej detektora [$d(\lambda)$] jest badany różnymi sposobami. W przypadku materiału fotograficznego czynimy to przez naświetlanie tzw. sensytogramu, który zostaje poddany pomiarom, na przykład mikrofotometrycznym, w celu ustalenia krzywej czułości spektralnej. Jest to na ogół krzywa nieregularna, nie podlegająca opisowi matematycznemu. W przypadku zaś różnych fotelementów czułość można ustalić, wykorzystując metodę spektrometrowania.

Transmisję $T(\lambda)$ używanych filtrów (układów optycznych) określa się przeważnie sposobem spektrometrowania. Przestrzenny rozkład własności $R(\lambda)$ lub $\varepsilon(\lambda)$ [$\rho(\lambda)$] ustalamy za pomocą spektrometrowania z wykorzystaniem przystawki goniometrycznej.

Jak z tego widać, wszystkie parametry wzoru (1) mogą być przedstawione w postaci wykresów lub tabel (tylko $E(\lambda)$, $\varepsilon(\lambda)$ także w postaci opisu matematycznego)*. Oczywiście jest, że znając wartość funkcji F , ze wzoru (1) możemy określić dowolny z rozpatrywanych parametrów, jeśli znamy pozostałe.

Na każdy z wykresów nałożone zostaną błędy pomiarów. Nie możemy więc jednoznacznie mówić o krzywej na przykład czułości spektralnej, ale o pewnym przedziale, który zawarty jest między dwiema krzywymi. Przewodząc zdalne badanie środowiska, rozpatrując konkretny element przedstawiony za pomocą detektora w postaci gęstości optycznej filmu albo wskazań przyrządów elektrycznych lub zaczernienia na ekranie, możemy ustalić jego współrzędne położenia x , y (gdy uzyskano obrazy stereoskopowe także z) oraz jeden parametr charakteryzujący: reemisję (emisję), rodzaj oświetlenia, czułość spektralną detektora, przestrzenne właściwości reemisyjne (emisyjne) elementu oraz wpływ środowiska przenoszenia informacji. Tym parametrem może być na przykład gęstość optyczna filmu, zaczernienie obrazu itp. Ponieważ po odpowiednich przekształceniach gęstość optyczna filmu, zaczernienie ekranu (TV, urządzeń termalnych, radioiokatorów), wskazania mierników elektrycznych dadzą się sprowadzić do wspólnego, określającego je symbolu, można posłużyć się parametrem gęstości optycznej rozumiejąc, że jest to symbol uogólniony, posiadający szerszy zakres pojęciowy niż klasyczna gęstość optyczna filmu. Tak więc rozpatrując konkretny element środowiska, mamy na jego obrazie współrzędne położenia oraz gęstość optyczną (D). Pomijając wpływ ośrodka przenoszenia informacji,

$$D = f [E(\lambda), d(\lambda), R(\lambda), T(\lambda), \varrho(\lambda)], \quad (2)$$

lub dokładniej dla przypadku detekcji z wykorzystaniem materiałów fotograficznych oraz krzywej posiadającej charakterystykę prostoliniową

$$D = f \log t \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda) d(\lambda) R(\lambda) T(\lambda) \varrho(\lambda) d\lambda, \quad (3)$$

gdzie:

- f — kontrast detektora przy założeniu, że jest on stały w przedziale λ_1, λ_2 ,
- λ_1, λ_2 — granice całkowania — jak w opisie wzoru (1),
- t — czas trwania ekspozycji (może być przyjęty w rozważaniach jako jednostkowy),

$E(\lambda), d(\lambda), R(\lambda), T(\lambda), \varrho(\lambda)$ — jak we wzorze (1).

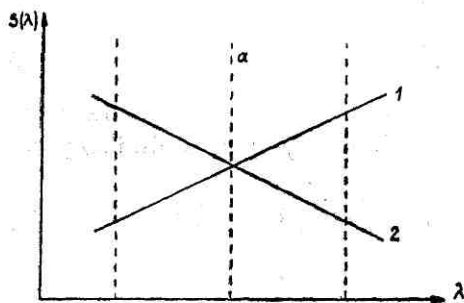
W przypadku innych detektorów istnieje potrzeba dodatkowych przeliczeń w celu sprowadzenia wskazań do wielkości (D).

* Dowolną krzywą można opisać w postaci matematycznej, jest to jednak bardzo pracochłonne i dla omawianego zagadnienia zbędne

Prowadząc zdalną detekcję środowiska, możemy każdemu jego elementowi przyporządkować określoną wielkość D lub wielkość ΔD względem pewnego elementu przyjętego na przykład za wzorzec. Ponieważ jednak każdy z elementów wzoru (3) został opisany pewnym przedziałem, a nie punktem, każdy element tła obrazu nie będzie posiadał ściśle określonego punktu, lecz pewien przedział, który może tworzyć różne zależności z przedziałami sąsiednimi. Dodatkową niedogodnością takiego uporządkowania elementów tła jest fakt, że przedział wykorzystywanego zakresu promieniowania elektromagnetycznego — przedział całkowany we wzorze (3) — jest przeważnie dość szeroki i ma określoną wartość. Zagadnienie to łatwo można wytłumaczyć na rys. 1, gdzie pola pod krzywą 1 i 2 są identyczne, a więc:

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} D_1(\lambda) d(\lambda) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} D_2(\lambda) d(\lambda). \quad (4)$$

W tym przypadku $D(\lambda) = E(\lambda) R(\lambda) d(\lambda) T(\lambda) \varrho(\lambda)$, gęstości optyczne D_1 i D_2 reprezentujące krzywe 1 i 2 będą identyczne lub zmieszczą się w przedziale błędów pomiarów. Tak więc biorąc pod uwagę jedno pasmo zbierania informacji, przyporządkowanie określonej, zmierzonej w czasie analizy obrazu wielkości D określonemu elementowi środowiska jest ograniczone faktami wynikającymi z błędnie ustalonych zależności występujących we wzorze (3) oraz wnioskami wypływającymi z rys. 1. Na przykład



Rys. 1. Zależność gęstości optycznej od długości fali dla dwóch elementów tła

zakładając, że błędy pomiaru parametrów wchodzących do ustalenia D pociągnęły za sobą pomiar D z błędem $\pm 0,2$, możemy przy zakresie pomiaru D 0—2 przyporządkować jednoznacznie tylko 5 elementów tła (pomijając przypadek pokazany na rys. 1). Biorąc pod uwagę olbrzymią różnorodność występujących elementów, jest to bardzo mało.

Jeżeli jednak podzielić przedstawione na rys. 1 pasmo od λ_1 do λ_2 na dwa pasma zawierające się w granicach od λ_1 do λ_3 i od λ_3 do λ_2 , to zakładając ten sam błąd ($\Delta D = 0,2$) oraz uwzględniając wspomniane zastrzeżenie, liczba możliwych do jednoznacznego wyróżnienia elementów tła wyniesie 5^2 .

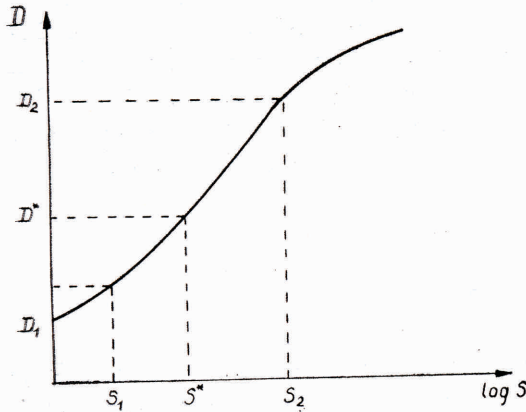
Nietrudno dowieść, że gdyby powiększyć liczbę pasm zbierania informacji, to jednoznacznie określone elementy wyraźnie wzrosłyby; i tak na przykład przy przyjętych założeniach oraz czterech pasmach liczba elementów wyniesie 625. Oczywiście, błąd wynikający z ustalenia D może być znacznie mniejszy, jeżeli zastosujemy przyrządy dobrej klasy, tym samym możliwe do wyróżnienia elementy będą liczniejsze. Człowiek, dokonując wzrokowej analizy obrazów, jest w stanie wyróżnić i zapamiętać tylko 5—8 tonów skali szarości, pomimo że progowa wartość czułości oka jest o wiele mniejsza i wynosi około 0,02 zależnie od ogólnej gęstości interpretowanego materiału. Nie jest możliwe zatem porównanie gęstości optycznej na kilku obrazach i wyszukiwanie tworzonych przez nie kombinacji przynależnej odpowiedniemu elementowi. Można tego dokonać co najwyżej w kilku punktach obrazu, i to używając odpowiednich przyrządów pomiarowych.

WIELOPASMOWA ANALIZA INFORMACJI

W dotychczasowych rozważaniach rozpatrywano element terenu, który jest jedynie małą cząstką całego obrazu otrzymanego w wyniku zdalnego badania środowiska. Inaczej można powiedzieć, że obraz przedstawia zbiór elementów zawierających prócz informacji o współrzędnych również informacje o gęstości optycznej D , a w przypadku obrazów z kilku pasm także informację o zależności $D(\lambda)$. Dzięki odpowiedniemu przekształceniu każdy obraz możemy przedstawić w postaci macierzy liczb lub znaków według odpowiednio przyjętego założenia, na przykład według posiadanej gęstości optycznej $[D]_m$. Liczba znaków w tak wykonanej macierzy zależna jest od konkretnych potrzeb, jej górną granicę warunkują parametry użytych przyrządów, natomiast dolną — konkretna potrzeba, która może dotyczyć równie dobrze tylko jednego elementu usytuowanego w lokalnych współrzędnych macierzy (obrazu).

W wyniku takiego rozumowania możemy zestawić dla każdego pasma odpowiednią macierz gęstości optycznej, pamiętając, że D jest funkcją (2) i (3). Uzyskamy w ten sposób zbiór macierzy $\{[D]_m\}_n$ o elementach odpowiadających liczbie wykorzystanych detektorów (n). Stosując odpowiednie przyrządy (na przykład spektrofotometry), możemy otrzymać krzywe właściwości reemisyjnych reprezentatywnych elementów środowiska $R(\lambda)$. Z otrzymanych dzięki spektrometrowaniu (lub spektrofotometrowaniu) wykresów lub tabel możemy utworzyć zbiór właściwości reemisyjnych $[R]_p$, gdzie p oznacza liczbę uzyskanych spektrogramów. Ze wzorów (2) i (3) wiemy o związku, jaki istnieje pomiędzy D i R , czyli między elementami D_m zbioru macierzy gęstości optycznej $\{[D]_m\}_n$ a elementami zbioru $[R]_p$. Prowadząc detekcję w znanych warunkach z wykorzystaniem znanych detektorów i filtrów, możemy w sposób ścisły ustalić związek pomię-

dzy gęstością optyczną D a $E(\lambda)$, $d(\lambda)$, $T(\lambda)$, $R(\lambda)$, $\rho(\lambda)$. Tak więc można dla danych warunków przeliczyć zbiór $[R]_p$ na zbiór $[S]_p^*$, reprezentujący przeliczone wartości R_p . Operacja ta jest bardzo pracochłonna, tym niemniej wykonywana oddzielnie dla każdego zbioru może być sporządzona za pomocą maszyny matematycznej. Jeżeli detekcja prowadzona była z użyciem materiałów fotograficznych, to zależności pomiędzy elementami zbioru $\{[D]_m\}_n$ a $\{[S]_n^*\}_p$ można pokazać na rys. 2. Przedstawia on



Rys. 2. Spektralna czułość detektora

charakterystykę detektora (filmu), gdzie S_1 i S_2 są elementami zbioru $[S]_n^*$, a D_1 i D_2 odpowiadającymi im elementami zbioru $\{[D]_m\}_n$. Elementy zbioru $\{[D]_m\}_n$ D_1 i D_2 wybrane są jako znane elementy obrazu i powtarzają się we wszystkich macierzach $[D]_m$. Zakładając, że odcinek krzywej $D(S)$ jest w zakresie naszych rozważań prostoliniowy, i znając D^* ze zbioru $[D]_m$, możemy przyporządkować mu $\{[S]_n^*\}_p$ ze zbioru $\{[S]_n^*\}_p$ według prostej zależności:

$$S^* = S_1 \left(\frac{S_1}{S_2} \right) \frac{D^* - D_1}{D_2 - D_1} \quad (5)$$

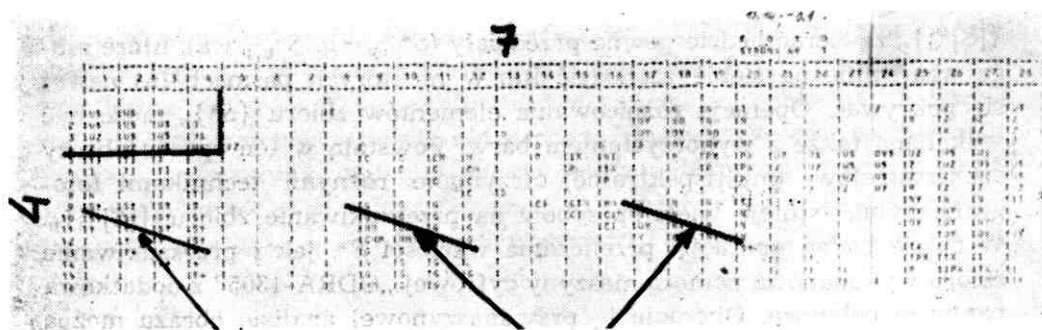
Nie zawsze można przyjąć, że odcinek charakterystyki detektora (materiału fotograficznego) jest prostoliniowy — w tym przypadku wzór (5) musi ulec pewnej modyfikacji.

Znając sposób przeliczania elementu m ze zbioru $[D]_m$ na m -ty element $\{[S]_n^*\}_p$, pozostaje zagadnienie odszukania elementu S^*_m w zbiorze $\{[S]_n^*\}_p$. Ponieważ w rzeczywistych warunkach liczba występujących elementów jest bardzo duża, zbiór $\{[S]_n^*\}_p$ może zawierać kilkaset i więcej elementów (p). Z rozważań w części pierwszej wiemy, że elementy zbioru $\{[S]_n^*\}_p$ ze względu na błędy zachodzące w czasie pomiaru oraz wiele trudno uchwytnych w czasie detekcji czynników nie będą przedstawione w postaci liczby, a w postaci pewnego przedziału ($S^*_{n,p} - \mu$, $S^*_{n,p} + \mu$), w którym μ zależec będzie od klasy użytych przyrządów, oddziaływania ośrodka przenoszenia informacji, detektora i innych czynników. Zbiór

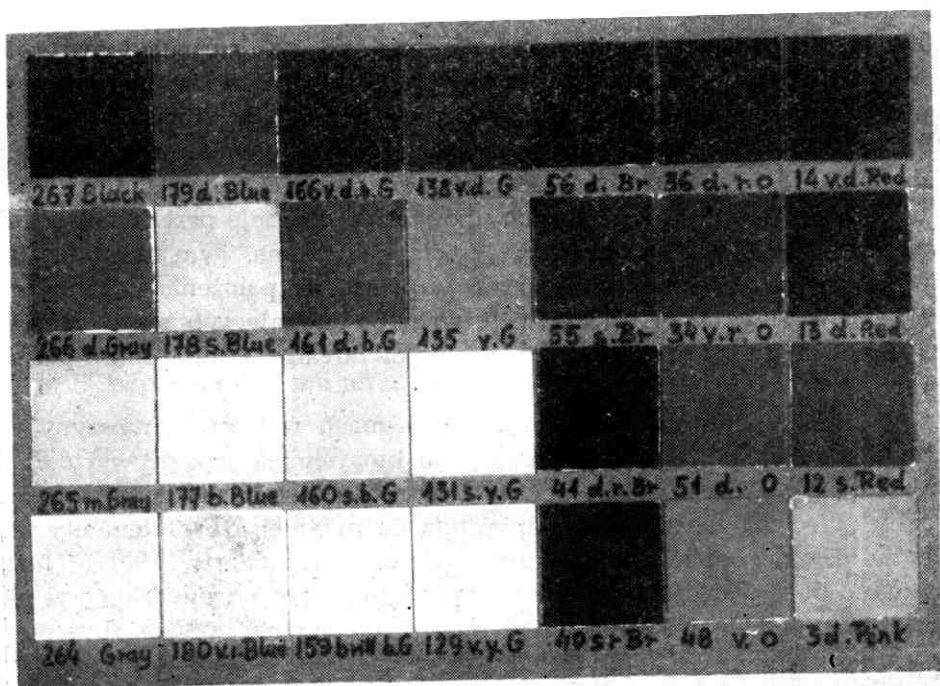
$\{[S]^*_n\}_p$ zawierać będzie pewne przedziały ($S^*_{n,p} - \mu$, $S^*_{n,p} + \mu$), które mogą wzajemnie na siebie zachodzić lub w niektórych pasmach (n) nawet się pokrywać. Operacja różnicowania elementów zbioru $\{S^*\}_p$ może być wykonana także z wykorzystaniem barw. Powstają w ten sposób obrazy spektrostrefowe (multispektralne) otrzymane różnymi technikami fotograficznymi. Istnieje wiele sposobów na przeszukiwanie zbioru $\{[S]^*_n\}_p$. W czasie badań operację przeliczania wartości S^* , jak i przeszukiwanie zbioru wykonano za pomocą maszyny cyfrowej „ODRA-1305” z dodatkową pamięcią bębnową. Operację tę przy maszynowej analizie obrazu można w znacznym skrócie opisać następująco: jak wynika ze wzoru (5) oraz z przyjętych oznaczeń dla każdego wykorzystywanego pasma detekcji (n) musi być utworzony oddzielny zbiór $\{[S]^*_n\}_p$, składający się z p elementów. Mając policzone wartości S^* z n -tego pasma, rozpatrujemy zbiór $\{S^*\}_p$ należący do tego pasma, na przykład i ($i=1, 2, \dots, n$), wybieramy z tego zbioru wszystkie elementy („przedziały $S^* \pm \mu$ ”), w których mieści się S^* , i zapamiętujemy położenie tych współrzędnych elementów w macierzy (zbiorze) $\{[S]^*_i\}_p$. Następnie bierzemy ten sam element z drugiego pasma, na przykład $i+1$, wykonujemy powtórnie operację przeliczenia na S^* i przeszukujemy w zbiorze $\{[S]^*_{i+1}\}_p$ dla $i+1$ pasma. Tym razem wynajdujemy tylko te elementy, których współrzędne położenia zapamiętano w i -tym paśmie. Współrzędne położenia powtarzających się elementów zapamiętujemy i w ten sposób operację powtarzamy z wszystkimi pasmami.

W wyniku eliminacji w kolejnych pasmach w pamięci maszyny cyfrowej pozostają tylko te elementy, dla których przeliczone wartości S^* mieszczą się we wszystkich zbiorach. Wykonując wydruk z pamięci maszyny cyfrowej, uzyskujemy odpowiedź na pytanie, które elementy macierzy $[D_m]_n$ odpowiadają danym elementom zbioru $\{S^*\}_p$. Jeżeli przyjęto dużą wartość μ , to na wydruku komputerowym uzyskano w niektórych przypadkach kilka elementów. Gdy wartość μ była zbyt mała, w pamięci nie było żadnych elementów.

Opisany sposób przeliczenia elementów D_m na S^*_p oraz prowadzenia eliminacji wykrytych elementów zakłada, że wszystkie wspomniane w pierwszej części parametry uzyskano w warunkach prawie idealnych. Stąd w przypadku występowania realnych warunków prowadzenia detekcji i odczytywania jej wyników należy do maszyny wprowadzić wiele poprawek uwzględniających wpływ czynników zewnętrznych. Na fot. 1 przedstawiono wydruki uzyskane z maszyny cyfrowej przy wykorzystaniu do analizy czterech pasm zakresu fotograficznego. Analizowano test laboratoryjny zamieszczony na fot. 2, składający się z 28 elementów barwnych, odpowiednio pogrupowanych, o nieznaczej w grupach różnicy barwy. Ze względu na potrzebę szybkiego sprawdzenia poprawności opracowanego programu oraz na odpowiednie zebranie danych do macierzy celowo wstawiono błędne dane, układając je w odpowiedni kształt geo-



Fot. 1. Przykład wydruku testu laboratoryjnego z maszyny cyfrowej



Fot. 2. Test laboratoryjny używany do analizy za pomocą maszyny cyfrowej

metryczny. Fot. 1 pokazuje uzyskane z pamięci EMG wydruki w postaci znaków drukarskich. Każdej literze (znakowi) odpowiada element zbioru $\{S^*\}_p$. W otrzymanej macierzy wyników w każdym elemencie zbioru $[D]$ mogło być wydrukowane 1—4 znaków określających zbiór $\{S^*\}_p$. W przedstawionym przykładzie otrzymano odpowiedzi w postaci jednego, dwóch i trzech znaków oraz puste pola, które świadczą, że w pamięci maszyny nie było zbioru elementów $\{S^*\}_p$ odpowiadających elementom macierzy $[D]$.

