

UDC 621.396.946

SCOPUS CODE 1711

<https://doi.org/10.36073/1512-0996-2020-1-52-58>

## ორგანზომილებიანი სიგნალები ამპლიტუდურ-ფაზური მოდულაციით

**ნოდარ უღრელიძე** რადიოტექნიკისა და მაუწყებლობის დეპარტამენტი, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, საქართველო, 0160, თბილისი, მ. კოსტავას 68<sup>ა</sup>  
E-mail: toban555@gmail.com

**ნონა დარასელია** რადიოტექნიკისა და მაუწყებლობის დეპარტამენტი, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, საქართველო, 0160, თბილისი, მ. კოსტავას 68<sup>ა</sup>  
E-mail: nonadari@yandex.com

### რეცენზენტები:

**ფ. ბოგდანოვი**, სტუ-ის ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტის პროფესორი  
E-mail: faik.bogdanov@emcos.coml

**ნ. აბზიანიძე**, სტუ-ის ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტის ასოცირებული პროფესორი  
E-mail: n.abzianidze@gtu.ge

**ანოტაცია.** ორამპლიტუდიანი სიგნალები ამპლიტუდურ-ფაზური მოდულაციით და მათი აგების რეგულარული პროცედურები, როცა სისტემა შეიცავს ლუწი და კენტი რაოდენობის სიგნალებს, გამოირჩევა სიმარტივით და, ფაზამოდულირებულ სიგნალებთან შედარებით, უკეთესი მაჩვენებლები აქვს. მოყვანილია ანალიზური გამოსახულებები ასეთი სიგნალების პარამეტრებისა და მახასიათებლების გამოსათვლელად. ამ პროცედურების გამოყენებით აგებულია კონკრეტულ სიგნალთა სისტემები 4 – 16 ზომის ალფაბეტისათვის და ცხრილის სახით წარმოდგენილია მათი პარამეტრები. გაუსის არხისათვის, კომპიუტერული მოდელირების გზით, აგებულია სიგნალთა შეცდომით მიღების ხარისხის გრაფიკული მახასიათებლები.

**საკვანძო სიტყვები:** ამპლიტუდა; მოდულაცია; სიგნალი; ფაზა.

### შესავალი

ბოლო პერიოდში, მრავალანტენიან სისტემათა მასიური დანერგვის პირობებში, მნიშვნელოვნად გაიზარდა ინტერესი ეფექტურ მოდულირებულ სიგნალთა მიმართ, რაც აისახა კიდევ სხვადასხვა სამეცნიერო ფორუმსა და გამოცემაში [1-6]. ამ მიმართულებით განსაკუთრებული ყურადღება ეთმობა სიგნალებს მარტივი რეალიზაციითა და მარტივი მიმღები მოწყობილობით [7]. ორგანზომილებიანი (2 Dimensional - 2D) სიგნალები ამპლიტუდურ-ფაზური მოდულაციით (Amplitude Phase Shift Keying - APSK) სწორედ ამ მაჩვენებლებითაა

გამორჩეული [8]. 2D სიგნალთა მრავალი APSK კონსტელაცია მოყვანილია ლიტერატურაში [8–9], სადაც წარმოდგენილია მათი პარამეტრები და მახასიათებლები, ასევე ფორმირებისა და დემოდულაციის სქემები. ესენია MAPSK სიგნალთა კონსტელაციები, ზომით  $M \geq 4$ . შემოთავაზებულია ასეთი ტიპის სიგნალების აგების ახალი რეგულარული მეთოდები და, შედეგად, აგებული სიგნალების პარამეტრები და მახასიათებლები.

**ძირითადი ნაწილი**

ქვემოთ განხილულია კონკრეტული კონფიგურაციის MAPSK კონსტელაციები სიგნალთა ენერჯიის მხოლოდ ორი მნიშვნელობით, კერძოდ, როცა კონსტელაციაში გრძელ სასიგნალო ვექტორს შესაბამება სიგნალი  $E_\ell$  ენერჯიით, ხოლო მოკლე ვექტორს –  $E_{sh}$ . თუ კონსტელაციაში სიგნალის საშუალო ენერჯიას ავიღებთ ერთის ტოლს ( $E_a = 1$ ) და ჩავთვლით, რომ ლუწი  $M$ -ის შემთხვევაში  $E_\ell$  და  $E_{sh}$  ენერჯიების მქონე სიგნალების რაოდენობა ერთნაირია ( $M/2$  და  $M/2$ ), ხოლო კენტი  $M$ -ის შემთხვევაში  $E_\ell$  ენერჯიის მქონე სიგნალების რაოდენობაა  $(M + 1)/2$  და  $E_{sh}$  ენერჯიის მქონე სიგნალების რაოდენობა –  $(M + 1)/2 - 1$ , შეგვიძლია დავწეროთ:

$$\begin{cases} E_\ell + E_{sh} = 2, M \text{ ლუწია;} \\ \frac{M+1}{M} \cdot E_\ell + \frac{M-1}{M} \cdot E_{sh} = 2, M \text{ კენტია.} \end{cases} \quad (1)$$

ვთვლით, რომ კონსტელაციის პირველი სიგნალი ( $s_1$ ) ყოველთვის გრძელი ვექტორია ნულოვანი საწყისი ფაზით ( $\varphi_1 = 0$ ), ხოლო თვით კონსტელაციის კონფიგურაცია ისეთია, რომ თითოეული მოკლე სასიგნალო ვექტორი მოქცეულია გრძელ ვექტორებს შორის, თან ყოველ გრძელ და მოკლე

ვექტორებს შორის კუთხე ყოველთვის არის  $\phi$ , რომელიც ტოლია:

$$\phi = \begin{cases} 2\pi/M, M \text{ ლუწია;} \\ \varphi_M / (M - 1), M \text{ კენტია.} \end{cases} \quad (2)$$

განვსაზღვროთ ევკლიდური მანძილის კვადრატის მინიმალური მნიშვნელობები:

– უახლოესი გრძელი და მოკლე ვექტორების შესაბამის სიგნალებს შორის

$$d_{\ell,sh}^2 = E_\ell + E_{sh} - 2\sqrt{E_\ell \cdot E_{sh}} \cdot \cos \phi; \quad (3)$$

– უახლოესი მოკლე ვექტორების შესაბამის სიგნალებს შორის

$$d_{sh}^2 = 2E_{sh} (1 - \cos 2\phi); \quad (4)$$

– თუ  $M$  კენტია, უახლოესი გრძელი ვექტორების შესაბამის სიგნალებს შორის

$$d_\ell^2 = 2E_\ell (1 - \cos \varphi_M) = 2E_\ell (1 - \cos [(M - 1)\phi]). \quad (5)$$

თუ სიგნალთა თანაფარდობა  $E_\ell$  და  $E_{sh}$  ენერჯიებს შორის არის

$$k = E_\ell / E_{sh} > 1, \quad (6)$$

მაშინ (1)-დან გვექნება:

$$\begin{cases} E_{sh} = 2 / (1 + k), M \text{ ლუწია;} \\ E_{sh} = 2 / \left( \frac{M+1}{M} \cdot k + \frac{M-1}{M} \right), M \text{ კენტია.} \end{cases} \quad (7)$$

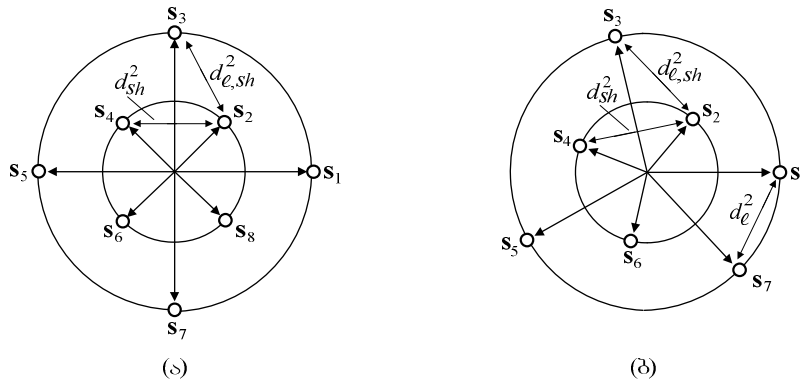
კონსტელაციათა მაგალითები, როცა  $M=8$  და  $M=7$ , მოყვანილია 1-ელ აბ სურათებზე.

ჩამოვაცალიბოთ კონსტელაციათა აგების პროცედურები:

– **M ლუწია.** დავუშვათ, რომ  $d_{\ell,sh}^2 = d_{sh}^2$ ; მაშინ, თუ ვისარგებლებთ (3), (4), (6) და (7) გამოსახულებებით,  $k$ -ს მნიშვნელობა გამოითვლება განტოლებიდან:

$$k - 2\sqrt{k} \cdot \cos \phi - (1 - 2\cos 2\phi) = 0, \quad (8)$$

ხოლო შემდგომ, (6) და (7) გამოსახულებების გამოყენებით, განისაზღვრება სიგნალთა ენერჯიები.



სურ. 1. რვაობითი (ა) და შვიდობითი (ბ) APSK კონსტელაციები

კონსტელაციის მინიმალური ევკლიდური მანძილის კვადრატის მნიშვნელობა

$$d_{\min}^2 = 2E_{sh} (1 - \cos 2\phi); \quad (9)$$

– **M კენტი**. დავუშვათ, რომ  $d_{\ell}^2 = d_{\ell,sh}^2 = d_{sh}^2$ , მაშინ, თუ ვისარგებლებთ (3)–(6) გამოსახულებებით, კენტი  $M$ -ის შესაბამისი  $\phi$ -ის მნიშვნელობები გამოითვლება განტოლებიდან:

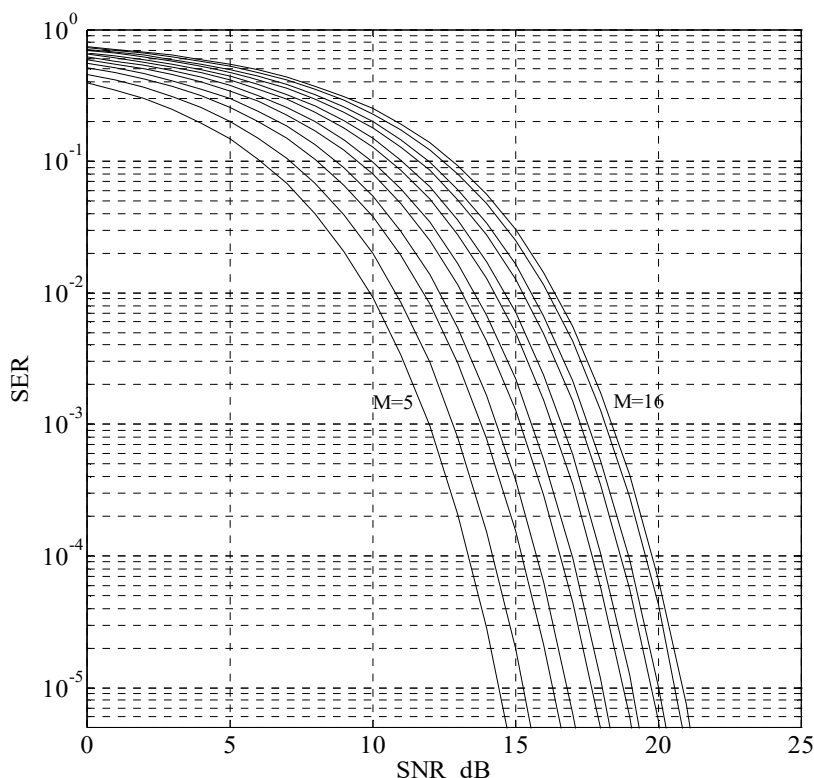
$$\begin{aligned} & (1 - \cos 2\phi) / (1 - \cos [(M-1)\phi]) - \\ & - 2\cos \phi \cdot \sqrt{(1 - \cos 2\phi) / (1 - \cos [(M-1)\phi])} - \\ & - (1 - 2\cos 2\phi) = 0. \quad (10) \end{aligned}$$

კონსტელაციის კონფიგურაციის გათვალისწინებით, მოცემული განტოლების ნამდვილი ამონახსნებიდან ვირჩევთ  $2\pi / (M + 1) < \phi < 2\pi / (M - 1)$  მნიშვნელობას, შემდგომ (6)–(9) გამოსახულებების შესაბამისად გამოვთვლით კონსტელაციის სხვა პარამეტრებსაც.

აღწერილი პროცედურების შესაბამისად აგებულ კონსტელაციათა პარამეტრები მოყვანილია ცხრილში და, მათგან გამომდინარე,  $M > 4$  შემთხვევაში უპირატესობა ენიჭება APSK სიგნალებს, ფაზამოდულირებულ (Phase Shift Keying - PSK) სიგნალებთან შედარებით.

**APSK კონსტელაციათა პარამეტრები**

M	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
$E_{\ell}$	1.5	1.4141	1.6	1.4693	1.5774	1.4676	1.5390	1.4494	1.5	1.4262	1.4639	1.4022	1.4314
$E_{sh}$	0.5	0.3789	0.4	0.3743	0.4227	0.4155	0.4610	0.4608	0.5	0.5028	0.5361	0.5404	0.5686
$\phi^{\circ}$	90	75	60	52.17	45	40	36	32.47	30	27.36	25.71	23.65	22.5
$d_{\min}^2$ APSK	2.0000	1.4141	1.2000	0.9339	0.8453	0.6867	0.6371	0.5312	0.5000	0.4248	0.4037	0.3478	0.3331
$d_{\min}^2$ PSK	2.0000	1.3820	1.0000	0.7530	0.5858	0.4679	0.3820	0.3175	0.2679	0.2291	0.1981	0.1729	0.1522



სურ. 2. 2D  $M$ -ობითი ( $M = 5, 16$ ) APSK სიგნალების SER მახასიათებლები

მე-2 სურ-ზე მოყვანილია MAPSK სიგნალების შეცდომით მიღების ხარისხის (Symbol Error Rate - SER) მახასიათებლები გაუსის არხისათვის. ისინი მიიღება მოდელირების შედეგად, რომლის დროსაც სიგნალ-ხელშემლის თანაფარდობის (Signal to Noise Ratio - SNR) ყოველი მნიშვნელობისათვის გადაიცემა 50 000 000  $M$ -ობითი საინფორმაციო სიმბოლო.

დასასრულ, რომელიმე კონსტელაციის შემობრუნება ნებისმიერი მიმართულებით და ნებისმიერი კუთხით მოგვცემს დისტანციურად ეკვივალენტურ კონსტელაციას.

### დასკვნა

მარტივი ამპლიტუდურ-ფაზამოდულირებული სიგნალების აგების ახალი რეგულარული (არაგადარჩევითი) მეთოდი იძლევა ორამპლიტუდიანი კონსტელაციების პარამეტრების განსაზღვრის საშუალებას. შემოთავაზებული მეთოდის გამოყენებით აიგო 4–16 ზომის კონსტელაციები, მოდელირების საშუალებით კი მიიღეს მათი მდგრადობის ხელშემშლელი მახასიათებლები. წარმოდგენილი შედეგები გვიჩვენებს აგებული სიგნალების უპირატესობას PSK სიგნალებთან შედარებით.

მოდელირება და გამოთვლები ჩატარდა Matlab და Maple სისტემებში.

### ლიტერატურა

1. Luna-Rivera J. M., Campos-Delgado D. U., Gonzalez-Perez M. G. Constellation design for spatial modulation. The 2013 Iberoamerican conference on electronics engineering and computer science. Procedia technology 7. 2013, 71-78 pp.
2. Renzo M. Di., Haas H., Ghrayeb A., Sugiura E., Hanzo L. Spatial modulation for generalized MIMO: Challenges, opportunities, and implementation. Proceedings of the IEEE. 102, (1). 2014, 56-103 pp.
3. Mesleh R., Ikki S. S., Aggoune H. M. Quadrature spatial modulation. IEEE Trans. Veh. Techn. 64, (6). 2015, 2738-2742 pp.
4. Cheng C.C., Sari H., Sezginer S., Su Y. T. New signal designs for enhanced spatial modulation. IEEE Trans. Wireless Commun. 15, (11). 2016, 7766-7777 pp.
5. Freudenberger J., Shavgulidze S. Signal constellations based on Eisenstein integers for generalized spatial modulation. IEEE Commun. Lett. 21, (3). 2017, 556-559 pp.
6. Ugrelidze N., Shavgulidze S., Sordia M. New generalized multistream spatial modulation for wireless communications. Proceedings of the 11<sup>th</sup> wireless days conference. 2019 Wireless Days (WD). Manchester. 2019, 1-7 pp.
7. Freudenberger J., Rohweder D., Shavgulidze S. Generalized multistream spatial modulation with signal constellations based on Hurwitz integers and low-complexity detection. IEEE Wireless Commun. Lett., 7, (3). 2018, 412-415 pp.
8. Sklar B. Digital communications. 2th ed. by Prentice Hall PTR. 2001.
9. Proakis J. G., Salehi M. Digital communications. 5th ed. by McGraw, Inc. 2008.

UDC 621.396.946  
SCOPUS CODE 1711

## Two-dimensional amplitude-phase shift keying signals

**Nodar Ugrelidze** Department of Radio-Engineering and Broadcasting, Georgian Technical University, 75 M. Kostava str, 0160 Tbilisi, Georgia  
E-mail: toban555@gmail.com

**Nona Daraselia** Department of Radio-Engineering and Broadcasting, Georgian Technical University, 75 M. Kostava str, 0160 Tbilisi, Georgia  
E-mail: nonadari@yandex.com

### Reviewers:

**F. Bogdanov**, Professor, Faculty of Power Engineering and Telecommunication, GTU  
E-mail: faik.bogdanov@emcos.coml

**N. Abzianidze**, Associate Professor, Faculty of Power Engineering and Telecommunication, GTU  
E-mail: n.abzianidze@gtu.ge

**Abstract.** The article discusses signals with two different amplitudes, obtained by amplitude-phase shift keying. Regular procedures for their construction are presented for the case when the system contains even and odd number signals. Analytical expressions are given to calculate the parameters and characteristics of such signals. Using the above described procedures, 4-16 alphabet sizes specific signal systems are constructed and their parameters are presented in a table. For the Gaussian channel, the graphical features of the symbol error rate are constructed using computer simulation method. These signals with amplitude-phase shift keying are characterized by simplicity and have better technical features than phase shift keying signals.

**Key words:** Amplitude; modulation; phase; signal.

UDC 621.396.946  
SCOPUS CODE 1711

### Двумерные сигналы с амплитудно-фазовой манипуляцией

**Нодар Угрелидзе**      Департамент радиотехники и вещания, Грузинский технический университет,  
Грузия, 0160, Тбилиси, ул. М. Костава, 68<sup>ა</sup>  
E-mail: toban555@gmail.com

**Нона Дараселия**      Департамент радиотехники и вещания, Грузинский технический университет,  
Грузия, 0160, Тбилиси, ул. М. Костава, 68<sup>ა</sup>  
E-mail: nonadari@yandex.com

#### Рецензенты:

**Ф. Богданов**, профессор, факультета энергетики и телекоммуникации ГТУ  
E-mail: faik.bogdanov@emcos.coml

**Н. Абзианидзе**, ассоциированный профессор, факультета энергетики и телекоммуникации ГТУ  
E-mail: n.abzianidze@gtu.ge

**Аннотация.** В статье рассмотрены амплитудно- фазовые манипулированные сигналы с двумя разными амплитудами. Описаны регулярные процедуры построения сигнальных векторов чётного и нечётного количества. Приведены аналитические выражения для расчёта параметров и характеристик таких сигналов. Согласно описанным процедурам, построены конкретные сигналы с размером алфавита 4-16. Их параметры сведены в таблицу. Методом компьютерного моделирования определены частоты символьных ошибок и представлены соответствующие кривые для Гауссовского канала. Достоинствами построенных сигналов являются их простота и лучшие по сравнению с фаза- манипулированными сигналами характеристики.

**Ключевые слова:** амплитуда; модуляция; сигнал; фаза.

*კანხილვის თარიღი 01.10.2019*

*შემოსვლის თარიღი 02.10.2019*

*ხელმოწერილია დასაბეჭდად 26.03.2020*