

# Kai kurie polivalentinių sistemų modeliavimo geometriniai aspektai

Irus Grinis, Feliksas Ivanauskas, Gediminas Stepanauskas

*Vilniaus Universitetas, Matematikos ir informatikos fakultetas*

Naugarduko g. 24, LT-03225 Vilnius

E. paštas: irus.grinis@mif.vu.lt, feliksas.ivanauskas@mif.vu.lt

E. paštas: gediminas.stepanauskas@mif.vu.lt

**Santrauka.** Šiame darbe nagrinėjami kai kurie polivalentinių sistemų modeliavimo geometriniai aspektai: ligandų ir receptorių sąveikos plokštumoje ir erdvėje

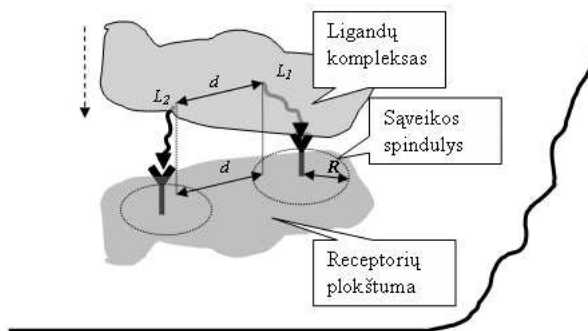
**Raktiniai žodžiai:** polivalentinės sąveikos, receptoriai, ligandai, polivalentinės sistemos, matematinis modeliavimas.

## Įvadas

Mažos biologinės dalelės (atskiros molekulės, baltymo, DNR, viruso, bakterijos ar pan.) valentingumas – atskirų tos pačios rūšies jungčių su kita dalele skaičius (žr., pavyzdžiui [1], dėl terminologijos). Atskira jungtis (toliau ją vadinsime tiesiog ryšiu) tarp dalelių formuojama sąveikos tarp ligando ir receptoriaus pagalba. Sąveikos, kurių valentingumas didesnis už vienetą, vadinamos polivalentinėmis. Mes nagrinėjame kai kuriuos geometrinius polivalentinių sąveikų modeliavimo aspektus. Valentingumas priklauso nuo daugelio fizikinių, cheminių, geometrinių sąveikaujančiųjų dalelių savybių. Atskirų polivalentinių sistemų analizei skirta nemažai dėmesio [1, 2, 3, 6]. Šiame darbe mes pateikiame ligando ir receptoriaus, receptorių paviršiaus, ligandų komplekso abstrakčius matematinius modelius, kurie gali būti panaudojami, kai kurių polivalentinių sąveikų analizėje. Straipsnio pabaigoje pateikiame algoritmą, kuris gali būti panaudotas ryšio tarp judančio taškinio ligando ir receptorių paviršiaus susidarymo tikimybei įvertinti.

## 1 Apibrėžimai, matematiniai modeliai ir jų aprašai

Tarkime, kad turime dviejų rūšių sąveikaujančias daleles. Viena rūšis (pavyzdžiui, bakterija, organizmo ląstelė) turi savo paviršiuje ar jo dalyje tam tikrą skaičių aktyvių vietų, kurias vadinsime receptoriais. Matematiškai galima susieti minėtą paviršių su tam tikru geometrinio paviršiumi, o atskirą receptorių – su tašku tame paviršiuje. Ligandai sąveikauja su receptoriais pagal taisyklę: vienas ligandas – vienas receptorių. Ligandų ir receptorių vietą erdvėje susiesime su taškų, kuriuos vadinsime ligando ar receptoriaus centrais, koordinatėmis. Šiame darbe mes postuliuojame, kad jeigu atstumas tarp ligando ir receptoriaus centrų mažesnis, negu nurodytas vadinamasis sąveikos spindulys, tai tarp jų atsiranda ryšys. Ryšio centru vadinsime atitinkamo receptoriaus centro koordinatas.



**1 pav.** Divalentčio ligandų komplekso ir receptorių plokštumos sąveika. Tam, kad susiformuotų abu ryšiai, reikia, kad abiejų ligandų centrai plokštumoje būtų nutolę nuo receptorių atstumu neviršijančiu  $R$ .

Šiame darbe nagrinėjame atvejį, kai dalelė su receptoriais yra pakankamai didelė, kad ją pačią ar jos dalį galėtume aproksimuoti tam tikru paviršiumi, pavyzdžiui, plokštuma, sfera, elipsoidu. Kita dalelė – ligandų kompleksas – aprėžta plokštuminė sritis, kurioje yra  $N$  ligandų. Ignoruodami daugybę fizikinių reiškinių, nagrinėjame paprastą sąveikos modelį:

- vienas ligandas ar receptorių gali sudaryti ryšį atitinkamai tik su vienu receptoriu ar ligandu;
- ligandų kompleksas juda tiesiu keliu taip, kad jo trajektorija arba kerta receptorių dalelės paviršių, arba yra pakankamai arti jos, kad būtų prasminga skaičiuoti ryšio tarp abiejų dalelių susidarymo tikimybę;
- iš visų  $N$  ligandų pirmas suformuoja ryšį tas, kurio atstumas iki artimiausio receptoriaus yra mažiausias ir neviršija sąveikos spindulio;
- analogiškai antras ryšys atsiras tarp to ligando ir receptoriaus, tarp kurių atstumas mažiausias iš likusių ir t. t.

Bendras susiformavusių pagal šią schemą ryšių skaičius ir bus valentingumas. Modelis, kuris tenkina išvardintas savybes, vadinamas modeliu be adaptacinės sąveikos. 1-jame paveikslėlyje iliustruojama divalentčio ligandų komplekso sąveika su receptoriais, kurios metu susiformuoja abu ryšiai. Jeigu ligandų kompleksas po pirmo ryšio susiformavimo pradeda transformuotis tol, kol nebus galimybės susiformuoti dar vienam ryšiui, tai tokią sąveiką vadinama adaptacine.

## 2 Receptorių plokštuma

### 2.1 Statusis kritimas

Tuo atveju, kai ligandų kompleksas labai mažas palyginus su receptorių paviršiumi, galima tą paviršių modeliuoti plokštuma ar jos dalimi. Pats paprasčiausias atvejis – ligandų kompleksas, kurio visi ligandai yra vienoje plokštumoje, lygiagrečioje receptorių plokštumai. Tarkime, kad ligandų kompleksas krenta ant receptorių plokštumos

90 laipsnių kampų. Nagrinėsime „standartinį“ receptorių išsidėstymą plokštumoje, kai jų centrai išsidėstę nepriklausomai vienas nuo kito pagal Puasono dėsnį (žr., pavyzdžiui, [4]) su intensyvumu  $\lambda$ : tikimybė, kad spindulio  $R$  skritulyje atsiras lygiai  $k$  receptorių, yra  $\exp(-\lambda S_R) \frac{(\lambda S_R)^k}{k!}$ , kur  $S_R = \pi R^2$  – minėto skritulio plotas. Visas sąveikas laikysime neadaptacinėmis.

**1 teorema.** Tegul receptorių centrai išsidėstę plokštumoje pagal Puasono dėsnį su intensyvumu  $\lambda$ , o sąveikos spindulys yra  $R$ . Tada teisingi teiginiai:

1. Tikimybė, kad vienvaiventinis ligando kompleksas susiformuos ryšį su kokiu nors receptoriumi plokštumoje, yra  $1 - \exp(-\lambda \pi R^2)$ ;
2. Jeigu  $N$  ligandų kompleksas yra toks, kad tarp bet kokių dviejų ligandų atstumas yra didesnis už  $2R$ , tai, tikimybė, kad susiformuos visi  $N$  ryšiai, yra  $(1 - \exp(-\lambda \pi R^2))^N$ ;
3. Ankstesnio punkto sąlygomis tikimybė, kad kompleksas sudarys bent vieną ryšį, yra  $1 - \exp(-N \lambda \pi R^2)$ ;
4. Antro punkto sąlygomis tikimybė, kad kompleksas susiformuos lygiai  $k$  ryšių, yra  $\binom{N}{k} (1 - \exp(-\lambda \pi R^2))^k \exp(-(N - k) \lambda \pi R^2)$ .

*Irodymas.*

1. Minėtoji tikimybė lygi tikimybei, kad atsitiktinai paimtame plokštumos  $R$  spindulio skritulyje atsiras bent vienas receptorius.
2. Kadangi receptoriai išsidėstę nepriklausomai vienas nuo kito, tai tikimybė, kad visuose  $N$  nepersidengiančiuose skrituliuose atsiras bent po vieną receptorių, yra nepriklausomų įvykių tikimybių sandauga.
3. Kadangi atstumas tarp ligandų yra didesnis už  $2R$ , tai atitinkami skrituliai, kuriuose turime rasti bent vieną receptorių sudarys bendrą plotą  $\pi R^2 N$ . Iš čia nesunkiai gauname reikiamą tikimybę.
4. Yra  $\binom{N}{k}$  galimybių pasirinkti  $k$  ligandų iš  $N$  galimų, kurių kiekvienas su tikimybe  $(1 - \exp(-\lambda \pi R^2))^k$  gali suformuoti ryšį, o likę  $N - k$  – su tikimybe  $\exp(-(N - k) \lambda \pi R^2)$  – jo nesuformuoti.

## 2.2 Tiesiškai judančio taškinio ligando atvejai

Tarkime, kad turime vienvaiventinį taškinį ligandą, kuris juda tiesiai, o jo trajektorija arba yra lygiagreti receptorių plokštumai, arba kerta ją tam tikrame taške.

### 2.2.1 Lygiagrečios trajektorijos atvejis

**2 teorema.** Tegul receptorių centrai išsidėstę plokštumoje pagal Puasono dėsnį su intensyvumu  $\lambda$ , sąveikos spindulys yra  $R$ , o judančio taškinio ligando trajektorija yra lygiagreti plokštumai tiesė su atstumu iki jos  $h$ . Tada bet kurioje trajektorijos atkarpoje  $AB$  tikimybė, kad ligandas nesudarys ryšio su kokiu nors receptoriumi plokštumoje, yra  $\exp(-\lambda S(A, B))$ , čia

$$S(A, B) = \begin{cases} 0, & \text{jeigu } h > R, \\ \pi(R^2 - h^2) + 2 \cdot \text{distance}(A, B) \cdot \sqrt{R^2 - h^2}, & \text{jeigu } h \leq R. \end{cases}$$

*Irodymas.* Tiesiog reikia pastebėti, kad potencialiosios srities plokštumoje, kur gali susidaryti ryšys, plotas yra  $S(A, B)$ .

## 2.2.2 Nelygiagrečios trajektorijos atvejis

**3 teorema.** Tegul receptorių centrai išsidėstę plokštumoje pagal Puasono dėsnį su intensyvumu  $\lambda$ , sąveikos spindulys yra  $R$ , o judančio taškinio ligando trajektorija yra tiesė, kuri kerta receptorių plokštumą ir sudaro su ja kampą  $\alpha$ ,  $0 < \alpha < \pi/2$ . Tada tikimybė, kad ligandas nesudarys ryšio su kokiū nors receptoriais iki susidūrimo su plokštuma, yra  $\exp(-\lambda S_\alpha)$ , čia

$$S_\alpha = \frac{1}{2}\pi R^2 \left(1 + \frac{1}{\sin \alpha}\right).$$

*Irodymas.* Pažymėkime  $k = \cot \alpha$ . Paimkime tą trajektorijos dalį, kurioje atstumas iki plokštumos neviršija sąveikos spindulio  $R$ . Nemažindami bendrumo šiuo atveju galime nagrinėti atkarpą  $AB$ , kur taškas  $A$  turi koordinatas  $(0, 0, R)$ , o  $B$  atitinkamai  $(kR, 0, 0)$ , t. y., trajektorija kerta  $Ox$  ašį. Atkarpą  $AB$  galima parametrizuoti taip:

$$\begin{cases} x(t) = kRt, \\ y(t) = 0, \\ z(t) = R(1 - t), \end{cases}$$

čia  $t \in [0, 1]$ . Potencialioji sritis  $S_\alpha$ , kurioje gali susidaryti ryšys, yra plokštumos  $Oxy$  skritulių, kurių centrai yra  $(x(t), 0, 0)$ , o spinduliai  $R(t) := \sqrt{R^2 - z^2(t)} = R\sqrt{(2-t)t}$ , sąjunga. Nesunku matyti, kad, kai  $t$  keičiasi nuo 0 iki tam tikro  $t_0$ , minėti skrituliai „auga“ taip, kad yra vienas į kitą įdėti. Iš tikrųjų, kai  $R(0) = 0$ , turime vieną tašką. Kai  $t \in (0, 1)$ , turime  $R'(t) \geq 0$  ir tik  $R'(1) = 0$ . Iš kitos pusės, minėtų skritulių „kairiausias“ taškas  $x_{\min}(t) := x(t) - R(t) = R(kt - \sqrt{(2-t)t})$  pasižymi tuo, kad  $x'_{\min}(t) < 0$ , kai  $t \in [0, t_0]$ , čia  $t_0 = 1 - \frac{k}{\sqrt{k^2+1}} = 1 - \cos \alpha$ .

Kai  $t \in [t_0, 1]$  panagrinėkime aukščiau minėtų skritulių, tiksliau juos ribojančių apskritimų, gaubtinę. Bendroji apskritimų lygtis yra

$$(x - x(t))^2 + (y - y(t))^2 - R^2(t) = 0,$$

t. y.,

$$(x - Rkt)^2 + y^2 - R^2t(2 - t) = 0.$$

Diferencijuodami pagal  $t$ , turime

$$kx - k^2Rt + R - Rt = 0,$$

t. y.,

$$t = \frac{kx + R}{R(1 + k^2)}$$

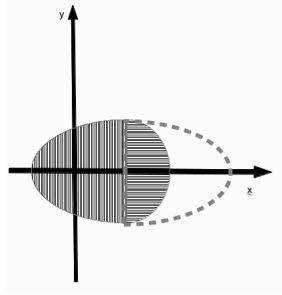
Įstatę  $t$  į apskritimų lygtį, gauname gaubtinės – elipsės lygtį:

$$\frac{R^2 + 2kxR + (-k^2 - 1)y^2 - x^2}{k^2 + 1} = 0,$$

kurią galima užrašyti taip:

$$\frac{(x - kR)^2}{(k^2 + 1)R^2} + \frac{y^2}{R^2} = 1.$$

Dabar nesunkiai gauname srities  $S_\alpha$  plotą. Reikia paimti pusę minėtos elipsės ploto ir pridėti dar pusę spindulio  $R$  skritulio ploto (žr. 2 pav.).



**2 pav.** Brėžinys 3 teoremai. Sritis  $S_\alpha$  sudaryta iš dviejų dalių: pusės elipsės ir pusės skritulio.

### 3 Bendras trimatis modelis: tikimybinio ryšių skaičiaus įvertinimo algoritmas

Šiame skyriuje panagrinėsime receptorių ir ligandų sąveiką trimatėje erdvėje. Tarkime, kad dalelė su receptoriais yra uždaras iškilus glodus (klasės  $C^1$ ) paviršius, kurio vidų žymėsime  $B$ , o  $\delta B$  – patį paviršių. Reikalausime papildomai, kad bet kuri spindulio  $R$  sfera, kurios centras guli viduje  $B$  ir yra nutolęs nuo paviršiaus daugiau negu  $R$ , pilnai priklausytų sričiai  $B$ . Vėl tarsime, kad receptoriai išsidėstę paviršiuje pagal Puasono dėsnį su parametru  $\lambda$ .

Pavyzdys. Nurodyto paviršiaus pavyzdys – elipsoidas, kurio visos ašys yra didesnės už  $2R$ .

#### 3.1 Skaitinis ryšio susidarymo tikimybės skaičiavimo algoritmas

Tarkime, kad paviršius  $\delta B$  duotas neišreikštine formule  $F(x, y, z) = 0$ . Judančio vienvalenčio taškinio ligando trajektorija tegul būna tiesės atkarpa  $T_1T_2$ , kurios galai žinomi iš anksto. Galime naudoti tokį algoritmą ryšio susidarymo tikimybei rasti.

1. Sudarome paviršių  $\delta B$  aproksimuojantį tinklėlį. Vienas iš būdų sukurti paviršiaus tinklėlį – pasinaudoti kokiu nors trianguliacijos algoritmu (dėl apibrėžimų žr., pavyzdžiui, [5]). Panaudodami paviršiaus  $\delta B$  savybes, konstruojame jos  $B$  aproksimaciją daugiasieniu, tenkinančiu savybes:
  - kiekviena daugiasienio viršūnė priklauso  $\delta B$ ;
  - kiekviena jo siena – trikampis, kurio visi taškai nutolę nuo  $\delta B$  ne daugiau, negu nustatytas rėžis  $\epsilon$ .
2. Tardami, kad ligandas juda nuo  $T_1$ , patikriname, ar jis kertą paviršių  $\delta B$ . Jeigu taip – perkeliame tašką  $T_2$  į susikirtimo vietą.
3. Pasirenkame aproksimuojančio daugiasienio sienas, kurių taškai nutolę nuo atkarpos  $T_1T_2$  ne daugiau, negu per sąveikos spindulį  $R$ . Tam galima panaudoti anksčiau pateiktas 2 ir 3 teoremas, nes užtenka patikrinti ar atitinkama siena, t. y., trikampis, kertasi su atitinkama sritimi, kur gali susidaryti ryšys, to trikampio plokštumoje ir apskaičiuoti sankirtos plotą.
4. Sumuojame visus praeitame žingsnyje minėtus sankirtų plotus.
5. Apskaičiuojame ryšio atsiradimo tikimybę.

## Išvados

Šiame straipsnyje analiziškai išnagrinėti paprasčiausi receptorių paviršių ir taškinių ligando sąveikos modeliai, pateiktas skaitinis algoritmas, kuris gali būti pritaikytas plačiai sąveikos modelių klasei. Ateityje planuojama šį algoritmą panaudoti realių biologinių sistemų tyrimuose

## Literatūra

- [1] C. Guo and H. Levine. A statistical mechanics model for receptor clustering. *J. Biol. Phys.*, **26**(3):219–234, 2000.
- [2] B.T. Houseman and M. Mrksich. Model systems for studying polyvalent carbohydrate binding interactions. *Top. Curr. Chem.*, **218**(1):1–44, 2002.
- [3] P. Klein, T. Pawson and M. Tyers. Mathematical modeling suggests cooperative interactions between a disordered polyvalent ligand and a single receptor site. *Curr. Biol.*, **13**(19):1669–1678, 2003.
- [4] K. Lange. *Applied Probability*. Springer-Verlag, 2003.
- [5] J.A. De Loera, J. Rambau and F. Santos. *Triangulations. Structures for Algorithms and Application*. Springer-Verlag, 2010.
- [6] J. Mathai Mammen, S.-K. Choi and G.M. Whitesides. Polyvalent interactions in biological systems: Implications for design and use of multivalent ligands and inhibitors. *Ang. Chem. Int. Ed.*, **37**(20):2754–2794, 1998.

## SUMMARY

### Some geometric aspects of polyvalent systems modeling

*I. Grinis, F. Ivanauskas and G. Stepanauskas*

In this paper we consider the interaction of ligands and receptors on the plane and in the space

*Keywords:* polyvalent interactions, receptors, ligands, polyvalent systems, mathematical modeling.