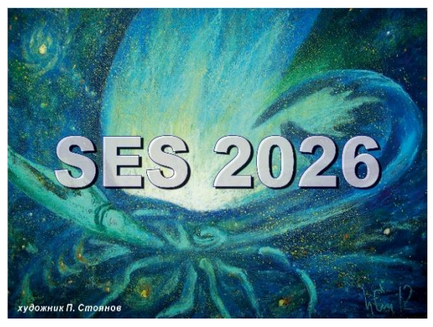
BULGARIAN ACADEMY OF SCIENCES

SPACE RESEARCH AND TECHNOLOGY INSTITUTE



РЕКОНСТРУКЦИЯ НА ПРОПУСКИТЕ В САТЕЛИТНИ ДАННИ ЗА NO_2, ПРИЧИНЕНИ ОТ ОБЛАЧНО ЕКРАНИРАНЕ, ЧРЕЗ ГЕОМЕТРИЧНА НАВИГАЦИЯ ВЪРХУ РЕКОНСТРУИРАН АТРАКТОР: КОНЦЕПТУАЛНА РАМКА

Пламен Тренчев

Space Research and Technology Institute, Bulgarian Academy of Sciences

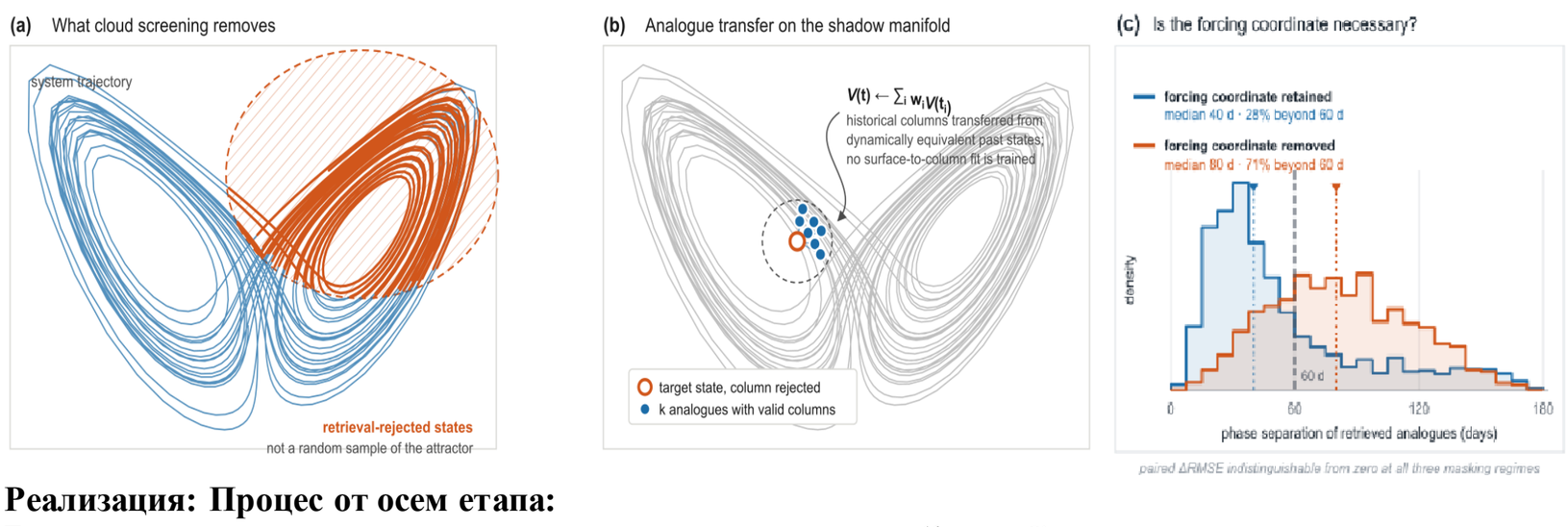
ptrenchev@space.bas.bg

Изследователска рамка: Облачното и качественото филтриране елиминират около 65% от дневните пиксели на TROPOMI за тропосферен NO_2. Пропуските не са случайни: съвпадат с метеорологичните условия, които предизвикват епизодите на замърсяване. Представяме концептуална рамка, разглеждаща градския NO_2 като принудена нелинейна динамична система, в която статистическата интерполация е заменена с аналогово заключение в реконструирано фазово пространство. Непрекъснатите наземни измервания на NO_2 и O_3 заедно с ERA5 образуват многомерно сенчесто многообразие, основано на теоремата на Старк за вграждане на принудени системи, което проследява състоянието на атмосферата и когато сателитният изглед е закрит от облаци. Липсващите стойности се реконструират чрез пренасяне на исторически TROPOMI стойности от динамично еквивалентни минали състояния; не се обучава регресия повърхност–колона. Разработваме два концептуални елемента. Първо, фотолитичните и граничнослоевите променливи действат като координати на въздействието, които предотвратяват смесването на несъвместими режими; аблация върху синтетична принудена система показва, че премахването им удвоява фазовото разделяне между целевото състояние и възстановените му аналози. Второ, конвергентното кръстосано картографиране служи като предварително условие за динамично свързване, а не като валидация пост-хок. Представяме осемстъпковата реализация и качествените свойства, които я отличават от оценителите с точкова загуба. Рамката е приложена към десет европейски градски станции в *Trenchev et al.* (2026), където конвергенция е постигната за всички 60 конфигурации на аблация ($p < 0,001$).

Запълването на липси като геометрична навигация: Разглеждаме градската атмосфера над станция като детерминистична система под външно въздействие, чието състояние се развива върху многообразие **M** с неизвестно измерение. Нито състоянието, нито **M** са наблюдаеми; наблюдаеми са приземните NO_2 и O_3 от непрекъснатия мониторинг и метеорологичните променливи от реанализа. Теоремата на Такенс и обобщението на Sauer и др. установяват, че за автономна система картата на координатите на закъснението е при достатъчно измерение дифеоморфно изображение на **M** - сенчесто многообразие, запазващо топологията. Атмосферата не е автономна: управлява се от дневния и сезонния цикъл и от синоптично въздействие, външно за станцията. Релевантен е не Такенс, а разширението на Старк за системи под въздействие: свойството на вграждане се запазва при условие че самото въздействие е представено в реконструкцията. Това е условието реконструкцията изобщо да е многообразие, а не проекция, в която се наслагват динамично несвързани състояния. Многомерната форма допуска смесени координати от няколко наблюдаеми. Полученото вграждане определя траектория, проследима и през облачни периоди, защото съставните ѝ измервания са наземни и непрекъснати. Спътниковите данни липсват; оценката на състоянието - не. Тази асиметрия е оперативната сърцевина на рамката (**Фигура 1**). Запълването протича като пренос, не като пригаждане. За целево време t с отхвърлено преминаване се намират k-те най-близки съседи на реконструираното състояние x(t) в библиотечното многообразие, ограничено до минали състояния с валидна колона. Оценката е:

$$\hat{V} = \frac{\sum_{i=1}^{N} \omega_i V(t_i)}{\sum_{i=1}^{N} \omega_i}, \omega_i = exp\left(-\frac{d_i}{d_1}\right)$$

където d_i е разстоянието до i-тия съсед във вграждането, а d_1 - до най-близкия. *Не се оценява функционална зависимост повърхност-колона, нито се предполага, че съществува.* Следователно две атмосфери в една и съща област на пространството на състоянията при същото въздействие имат същата колона. По конструкция обаче не се запазва дисперсията: претеглената средна на k аналога я компресира, поради което *Trenchev et al. 2026* прилага експлицитна стъпка за възстановяване при случайни и зависими от ковариати липси.



Фиг. 1. Запълване на пропуските в геометрична рамка. (**a**) Филтрирането на облаци не взема проби от пространството на състоянията на системата равномерно: отхвърлените състояния заемат свързана област от атрактора, а не произволно подмножество, което прави липсващите данни неигнорируеми. (**b**) В формулировката на „сенчесто многообразие“ състоянието при отхвърлено преминаване остава възстановимо от непрекъснати наземни наблюдаеми величини, а оценката на колоната се получава чрез прехвърляне на исторически стойности от k-те динамично най-близки минали състояния, при които съществува валидно възстановяване; *не се оценява връзка между повърхността и колоната*. (**c**) Изискването за координатата на въздействието е тествано директно върху синтетична система „Lorenz-96“ с външно въздействие: премахването на координатата на въздействието удвоява медианното кръгово фазово разделяне между целево състояние и неговите възстановени аналози и повишава дела на целите, чиито аналози произхождат от различна част на годишния цикъл, от 28% на 71%. Панелът показва едно представително повторение (медиани 40 д и 80 д); медианите за 20-те повторения са 40 д и 79 д. Силуетите на атракторите в (а) и (б) са схематични и не съдържат данни..

Реализация: Процес от осем етапа:

Трите концептуални елемента се реализират в поредица от осем етапа (фигура 2), всеки от които дава отговор на един ясно формулиран въпрос. Архитектурата се описва тук, защото концептуалната аргументация е толкова добра, колкото и нейните оперативни ангажименти: всеки етап съответства на решение, което читателят би могъл да вземе по различен начин, а назоваването им прави рамката фалсифицируема, а не просто правдоподобна.

Обработка на сигнала. Непрекъснатият наземен запис съдържа инструментален шум, който би нарушил структурата на съседството на вграждането. Анализът на сингулярния спектър отделя детерминистичната компонента, като запазеният ранг се избира чрез критерий за точност на прожекцията „leave-one-out“ на симплекс, а не чрез фиксиран праг на дисперсията – рангът, който най-добре подкрепя краткосрочната прогноза, а не този, който обяснява най-голяма част от дисперсията.

Конструиране на многообразие. Многовариантната реконструкция на сенчесто многообразие претърсва пространство от кандидатни вграждания, всяко от които представлява подбор от изходни редове и закъснения, и запазва онези с най-добрата точност извън извадката. Прогнозата се формира от ансамбъл от най-високо класирани гледни точки, а не от едно-единствено вграждане, което както стабилизира оценката, така и избягва обвързването с една произволна реконструкция.

Координати на форсиращите фактори. Тук се включват индексът на фотолитичния режим и височината на граничния слой.

Претегляне на наблюденията. Тъй като достъпността на извличането сама по себе си зависи от състоянието, състоянията в библиотеката се претеглят с обратната стойност на тяхната оценена вероятност за извличане, така че библиотеката да не бъде незабележимо доминирана от режима при благоприятни метеорологични условия.

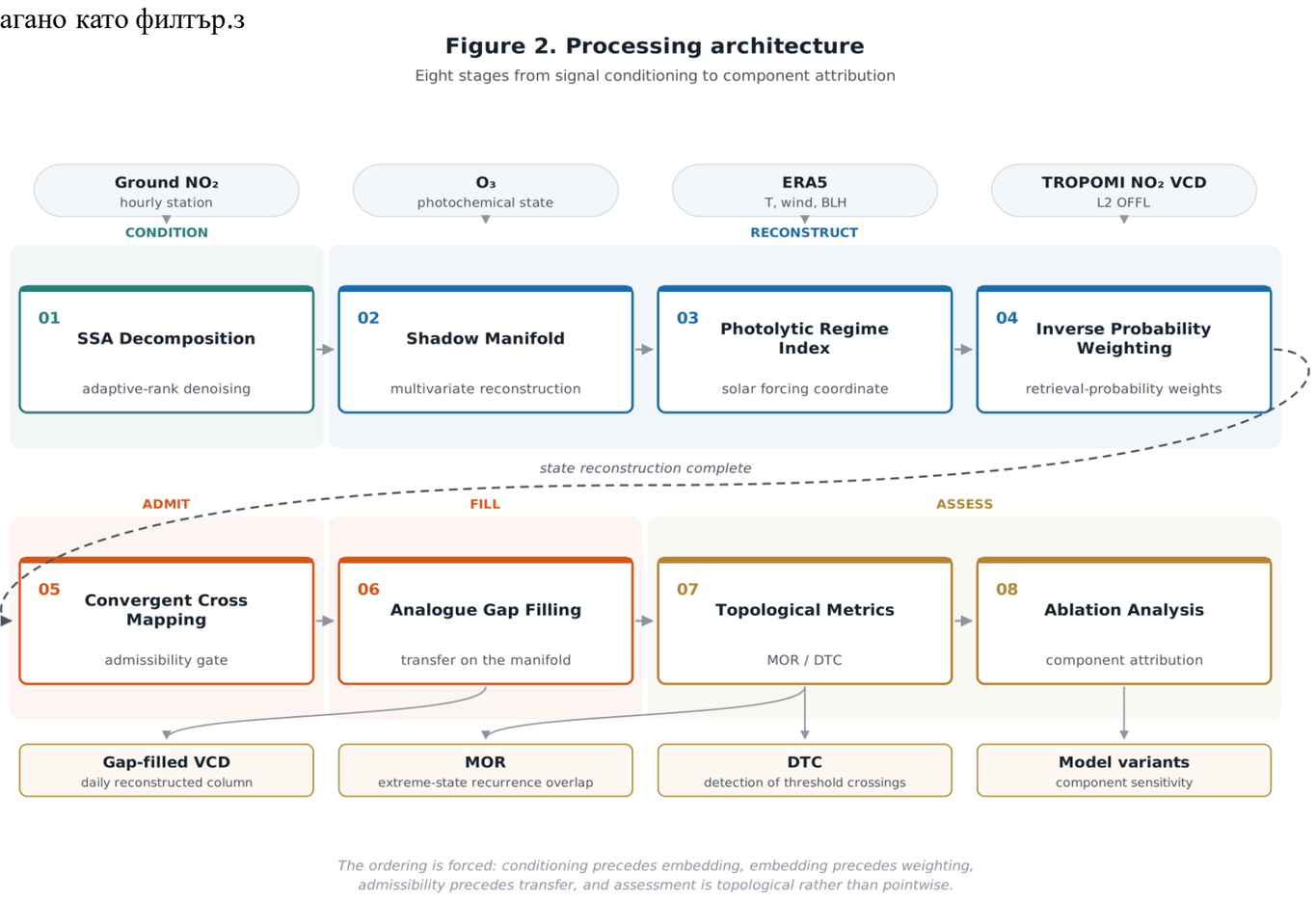
Допустимост. Конвергентно кръстосано съпоставяне спрямо сурогатни ансамбли, прилагано като филтър.з

Трансфер. Аналогово извличане и претеглен по разстояние трансфер на исторически колони.

Топологична оценка. Две метрики разглеждат това, което конвенционалните мерки за грешка не обхващат. Коефициентът на припокриване на многообразието (MOR) количествено измерва припокриването на структурата на повторенията между наблюдаваните и реконструираните записи в екстремния режим. Динамичното улавяне на тенденции (DTC) количествено измерва съгласието при превишения над 95-ия перцентил, претеглено по точност на амплитудата и по съотношението между прогнозирания и наблюдавания размах. И двете отговарят на въпроса дали допълненият запис има същата динамична структура като оригинала, а не дали е близо до него в отделни точки. Това разграничение е важно, защото един запис може да бъде точен средностатистически, но в същото време да е безполезен за епизодите, които е трябвало да представи.

Аблация. Всяка конфигурация се изпълнява повторно с премахнати компоненти, така че всяко отчетено свойство да може да се приписва на конкретен елемент, а не на ансамбъла като цяло.

Редът не е произволен. Кондиционирането трябва да предшества вграждането, защото шумната поредица води до фалшиви съседи; вграждането трябва да предшества претеглянето, защото теглата се дефинират върху реконструираните състояния; допустимостта трябва да предшества трансфера, защото трансферът през непроверено свързване не е интерпретируем; а оценката трябва да бъде топологична, а не точка по точка, защото твърдението на рамката се отнася до структурата.



Качествени свойства на геометричната формулировка

Четири свойства произтичат от самата формулировка, и всяко от тях е наблюдавано във всичките десет станции, изследвани в [7].

Въздържане вместо фалшива точност. Когато в библиотеката не съществува динамично съвместим аналог, методът не връща оценка. В една станция в [7] това доведе до отсъствие на резултати, вместо до число, което беше третирано като правилен резултат. Регресията връща числово добре оформена стойност при идентични обстоятелства и нищо в нейния резултат не отличава този случай от информиран такъв.

Наличност при всеки преминаващ обект. Регресията с лаг-характеристики изисква пълен вектор от предиктори и без предупреждение отказва да прави прогнози, когато самите предходни наблюдения липсват; в зимната тестова подгрупа от [7] значителна част от кандидатните преминавания беше загубена по тази причина. Геометричната формулировка изисква само текущото състояние да може да бъде реконструирано и да съществува съвместимо съседство, и дава оценка при всяко преминаване. При неигнорируеми липси дните, в които предикторите, базирани на лаг, се провалят, също не са случайна подгрупа.

Запазване на екстремната структура. За всички станции, режими на аблация и липсващи данни, изследвани в [7] – над 3600 оценки – нито един нединамичен референтен метод (случайна гора върху пълни и само метеорологични набори от предиктори, персистентност, климатология, линейна интерполация) не постигна коефициент на припокриване на многообразието над 0,104, докато динамичният метод никога не падна под 0,59. Двете разпределения са разделени от фактор, надвишаващ пет, в най-близката си точка, без никакво припокриване.

Отклонението като диагностичен показател, а не като дефект. Когато библиотеката обхваща динамичните режими, присъстващи в периода на оценката, отклонението е пренебрежимо малко. Когато системата се е отклонила извън него – поради промяна в базовата линия на емисиите или комбинация от режим на затопляне и циркулация, които липсват в историческите данни – се появява систематично отклонение, чийто знак показва посоката на отклонението. За аналогов метод това е правилното поведение: отклонението е показател, че атракторът, от който библиотеката взема проби, вече не е атракторът, от който атмосферата взема проби