L-ISA Processor 오브젝트 렌더링의 블랙박스 식별

출력 게인·딜레이·주파수 응답의 계산 모델과 사전 예측 검증

Taebin Yoo | 2026-10-21 | Revision 1.1
대상: L-ISA Controller v3.2.2.12429 / L-ISA Processor (Desktop) v3.2.2.5865, 48 kHz

---

초록

L-ISA Processor의 오브젝트 렌더링을 디지털 루프백 전기 측정으로 식별했다. Pan은 Soundscape 원점에서 본 2D VBAP 탄젠트 법칙이다. 여기에 저역은 진폭·전력 정규화의 기하평균, 고역은 전력 정규화로 가는 2차 셸프(fc = 517.1 Hz, Q = 0.593)가 붙는다. Distance는 3차 다항식 게인 $G(d) = -(15.88d - 21d^2 + 25d^3)$ dB와 1차 디지털 HF 필터로 분리된다. Elevation은 볼록껍질 기반 3D VBAP다. 이 모듈들을 측정 전에 고정해 예측한 결과, 새 16스피커 원호, 순서·ID 교체, 그룹 속성 변경, 9.1.6, 홀드아웃 Island A, 비대칭 6스피커, w=0 무작위 120출력에서 모두 최대 0.03 dB 이내였다. 반면 홀드아웃 Island B의 Elevation 사전 예측은 최대 54.4 dB로 실패했다. 원인은 공면 사각형 면의 삼각분할 동점 해소였다. 후속 사전 시험에서 hwOut·그룹 순서·이름·위치·조준각을 기각했고, 스피커 UUID 의존을 확인했다. 그 결과 얻은 "UUID 내림차순 점진 삽입" 규칙은 UUID를 바꾼 Island 사본의 사전 예측(144출력)에서 최대 0.027 dB로 맞았다. Width는 24샘플 2탭 디코릴레이션과 ±30°·w 지지 구간까지 식별했으나 분포 커널과 정규화를 확정하지 못했다. 입력 딜레이는 이 구성에서 출력에 반영되지 않았다. 사후 적합(거울상 1세션을 제외한 w=0 1,936출력, 최대 0.027 dB)과 사전 예측 결과를 구분해 보고하고, 미해결 부분은 수치 경계와 함께 미확정 모듈로 정리한다.

주요어 L-ISA · 객체 기반 오디오 · VBAP · 블랙박스 측정 · 시스템 식별 · 사전 예측

---

1 연구 배경과 검증 질문

이전 Sound xR Image 연구(`reference/AFC_SoundxR_report_ko.pdf`)는 사후 적합 0.006 dB가 새 배치의 사전 예측 9.29 dB 실패로 이어질 수 있음을 보였다. 본 연구는 같은 원칙으로 L-ISA Processor를 다룬다. 질문은 다음과 같다.

1. Pan, Width, Distance, Elevation이 스피커별 출력 게인, 딜레이, 주파수 응답을 어떻게 바꾸는가.
2. 그룹 속성(VirtualDistance, MaxGainGradient), Usage, 처리 모드(2D/3D), 스피커 순서·ID가 렌더링에 관여하는가.
3. 학습에 쓰지 않은 템플릿과 새 배치에서, 측정 전에 고정한 예측이 맞는가.

목표는 내부 구현의 복원이 아니라, 같은 입력에 같은 출력을 내는 계산 모델(`model.py`)이다.

2 실험 방법과 자료 처리

신호 경로. Python(`tools/rig.py`) → L-ISA Audio Bridge(입력) → Processor → BlackHole 64ch 출력 1-16 → Python 녹음. Processor 출력은 16채널 고정 창이라 18.1.4 Island(22스피커)는 출력 창이 겹치는 세션 A(#1-16)와 B(#7-22)로 나눴다. 리버브(early/cluster/late)는 끄고, FX는 모든 소스에서 비활성 상태다.

측정 시료. 템플릿은 사용자 지시로 3개로 한정했다. 학습은 7.1 Red Rocks(2D frontal)와 9.1.6 Atmos(360°+Tops, 3D), 홀드아웃은 18.1.4 Bluspace Island다. 파생 세션은 Red Rocks, 9.1.6, Island B의 사본이다(순서 교체, VD/MGG 변경, 비대칭 6스피커, 5°·7.5° 간격 조밀 원호, Tops 순서·이름·거울상·UUID·조준각 변형, Island B UUID 교환본). 원본 템플릿은 수정하지 않았다.

시간 기준. 재생과 녹음은 서로 다른 CoreAudio 장치라 샘플 동기가 아니다. 그래서 한 스트림 안에서 ch2(Source 2: 중앙, d = 0.15, 리버브·딜레이 off)를 기준 스윕으로 먼저 재생하고, 2.6 s 뒤 ch1(시험 소스)을 재생했다. 딜레이는 이 기준 대비로 정의한다.

디컨볼루션과 특징. 2 s 로그 스윕(–20 dBFS)을 재생 신호로 나누는 정규화 스펙트럼 나눗셈을 썼고, 대역 경계는 코사인 테이퍼로 처리했다. 두 스윕 사이 누설은 약 –156 dB다. 게인 L은 1 kHz 1/3옥타브 평균 전력(dB), 딜레이는 200-4000 Hz 위상 기울기(샘플)와 포물선 보간 피크로 정의하고, 1/3옥타브 응답도 함께 저장했다.

잔차. 오차는 식 (R)로 계산한다.

$$e_j = L_{meas,j} - L_{model,j}\,, \quad E_{RMS} = \sqrt{\mathrm{mean}(e_j^2)} \qquad (R)$$

출력이 디지털 무음이거나 –120 dB(검출 하한) 미만이면 값을 그대로 기록하고 비교에서 뺐다. 대칭값으로 채우거나 0으로 바꾸지 않았다. 모든 출력의 전체 설정은 `data/measurements.csv`에 있다.

측정 품질. 경로는 결정론적이다. 같은 설정 반복의 차이는 0.0000 dB이고, –30/–20/–10 dBFS 입력 사이 게인 차이도 0.0000 dB다(다이내믹 처리 없음). OSC 변경 후 정착은 13 ms이며 측정 대기는 0.25 s로 잡았다. 정방향/역방향 스윕 왕복의 차이는 Pan 0.000 dB, Width 0.0005 dB였다. 0.006 dB 수준의 잔차 바닥은 측정 창과 대역 평균의 수치 산물이며, 장비 불확도로 해석하지 않는다.

측정 경로 오류와 정정(Cycle 1). Phase 0에서는 1채널 출력 스트림을 열었다. CoreAudio가 이를 Audio Bridge ch1+ch2로 복제해서, 고정된 중앙 소스(리버브 on)가 섞였다. Phase 0의 "p와 무관한 out4-7 성분"은 이 리버브 꼬리였다. 이후 모든 측정은 8채널 스트림으로 ch1만 구동한다. Phase 0 원자료 표는 무효로 처리하고, 정착·선형성·반복성 결론만 유지했다.

3 모델과 수식

기호 정의. 스피커 i의 Soundscape 원점 기준 방위 φ_i(0° = +Y, +X 방향이 양수), 고도 ε_i, 단위벡터 u_i. 오브젝트 파라미터 p, w, d, e ∈ [0, 1](OSC 정규값).

Pan 각도 (사전 c02, 홀드아웃 성공)

$$\theta(p) = \theta_{min} + p\cdot(\theta_{max} - \theta_{min}) \qquad (1)$$

$$\text{Auto(frontal):}\quad \theta_{min} = \min_i \varphi_i\,, \quad \theta_{max} = \max_i \varphi_i \quad \text{(Height/Bottom 제외; 로드 시 재계산)}$$

(1b)

360° 범위: $\theta_{min} = -180°$, $\theta_{max} = 180°$

2D 쌍 패닝 (사전 c02): 방위 순서상 θ를 둘러싼 인접 쌍 (i, j), 360° 범위에서는 링으로 닫는다.

$$[g_i \;\; g_j]^T = [u_i \;\; u_j]^{-1} \cdot u(\theta)\,, \quad \text{음수는 } 0\,, \quad \text{나머지 스피커 } g = 0$$

(2)

Scene, Extension, Surround, 360 그룹은 Z와 무관하게 한 평면의 링으로 함께 정렬된다(Red Rocks의 ExL-Sc1, 9.1.6의 Rear-Side 쌍).

주파수 의존 정규화 (사후 c02, 2변수 적합; 이후 모든 사전 예측에 고정 사용)

$$n_{H,i} = g_i / \|g\|_2\,, \quad n_{L,i} = g_i / \sqrt{\|g\|_1\,\|g\|_2}$$

$$N_i(s) = \left(n_{L,i} + \sqrt{n_{L,i}\, n_{H,i}}\cdot s/Q + n_{H,i}\cdot s^2 \right) / \left(1 + s/Q + s^2 \right)\,, \quad s = jf/f_c$$

(3)

$f_c = 517.08$ Hz , $Q = 0.5932$

단일 스피커이면 N = 1이다. 쌍 중앙에서는 저역이 고역보다 최대 1.5 dB 낮다(= ½·20log$_{10}$(‖g‖$_1$/‖g‖$_2$)).

Distance 게인 (사후 c04, 21점 잔차 < 0.0001 dB)

```
G(d) = −(15.88·d − 21·d² + 25·d³)  [dB]        (distatt/gain = 1일 때; 0이면 G = 0)
(4)
```

Distance HF 감쇠 (사후 c04, 경험표)

```
H_HF(z) = (1−a)/(1−b) · (1 − b z⁻¹)/(1 − a z⁻¹) ,  a(d), b(d): data/c04_hf_fit.json 스플라인
(5)
```

나이퀴스트 이득은 d = 1에서 −20.0 dB, 1 kHz 영향은 d = 1에서 −0.31 dB다. a(d), b(d)의 닫힌 형태는 미확정이다.

3D Elevation (사전 c08): Height/Bottom 그룹이 있으면 3D 모드다. 오브젝트 고도는 ψ = 90°·e이고, 스피커 고도는 Height 그룹만 atan(z/수평거리)를 쓰며 나머지는 0이다.

```
[g_a g_b g_c]ᵀ = [u_a u_b u_c]⁻¹ · u(θ, ψ)  (모든 성분 ≥ 0인 볼록껍질 삼각형; 아래 면 제외)
(6)
공면 다각형 면: 꼭짓점을 UUID 문자열 내림차순으로 점진 삽입해 분할                    (7)
   (첫 3점 → 삼각형, 이후 점 → 현재 다각형의 양 이웃과 삼각형; 사각형이면 최소 UUID를 피하는 대각선)
   (사후 c18, 사전 c20 성공)
```

e = 0이면 (6)은 (2)와 같다.

출력 응답과 딜레이

```
H_i(f) = N_i(f) · 10^(G(d)/20) · H_HF(f; d)    →   L_i = 10·log₁₀ mean_{1 kHz 1/3oct} |H_i|²
(0)
τ_i = 위상기울기[H_i] − 위상기울기[H_HF(·; 0.15)]   (입력 딜레이는 출력에 반영되지 않음, §4.4)   (8)
```

Width(w > 0)는 (0)에 포함하지 않는다. `model.py`는 w > 0이면 예외를 낸다(§6).

4 파라미터별 결과

4.1 Pan (Red Rocks, 9.1.6, 조밀 원호)

c02의 사전 예측 H1(VBAP 탄젠트 법칙 + 전력 정규화 + 상수)은 51조건 99출력에서 활성 스피커 집합이 모두 맞았다(RMS 0.139 dB, 최대 0.199 dB). DBAP 후보 H2는 활성 집합이 51/51 모두 틀려 기각했다. 측정 게인 비에서 역산한 방향은 θ(p)와 1e-4° 안에서 일치했고, 남은 0.2 dB는 쌍 중앙의 전력 부족(0.955)이었다. 1/3옥타브 응답을 보면 쌍의 두 채널은 같은 필터를 공유했다. 이 필터는 고역에서 전력 정규화와 0.01 dB 안에서 같고, 저역은 진폭 정규화 쪽으로 내려갔다. 이를 식 (3)으로 정리했고, 공유 파라미터 2개로 2-스피커 곡선 96개가 30 Hz–16 kHz에서 최대 0.012 dB, 0.10° 안에 맞았다.

표 1 Pan 관련 잔차(1 kHz)

조건 / 원자료	구분	기록 수	출력 n	RMS dB	최대 dB
Red Rocks p 51점 / `c02_pan.jsonl`	사전 H1	51	99	0.139	0.199
Red Rocks p 51점×2 / `c02_pan.jsonl`	사후 (1)-(3)	102	198	0.0032	0.0061
5° 조밀 16스피커 / `c05_dense.jsonl`	**사전**	23	40	0.0031	0.0058
9.1.6 360° 링 / `c08_916.jsonl`	**사전**	41	77	0.0035	0.0061
비대칭 6스피커 / `h02_asym6.jsonl`	**사전 (1b)**	41	80	0.0032	0.0062
Island A / B 360° / `h01_island_*.jsonl`	**사전**	82	118	0.0034	0.0062

비대칭 배치의 Auto 범위 대안도 측정 전에 함께 기록했다. 대칭 ±max(RMS 6.13 dB)과 세션 저장값(RMS 9.23 dB)은 기각됐다. Controller는 로드할 때 Auto 범위를 [최소 방위, 최대 방위]로 다시 계산한다.

4.2 Distance

스위치 4조합(gain/HF on·off) × p ∈ {0.5, 0.44} × d 21점을 측정했다. 게인 경로와 HF 경로는 곱으로 분리되며 합의 오차는 0.0004 dB다. 패닝 비는 d와 무관하다. 게인 곡선은 정확한 3차식 (4)이고 p와 무관하다(p = 0.5, 0.44, 0.1 모두 d = 1에서 −20.188 dB). 초기 관측의 상수 −1.995 dB는 G(0.15) + HF(0.15)다. HF는 1차 극-영점 필터 (5)로 21점 모두 0.014 dB 안에 맞는다.

표 2 Distance 잔차(사후 모델, 1 kHz)

조건 / 원자료	기록 수	출력 n	RMS dB	최대 dB
스위치 4조합 × d 21점 / `c04_distance.jsonl`	168	252	0.0049	0.0061
UI 딜레이 ON, d 21점 × p 3 / `c04b_delay.jsonl`	63	105	0.0054	0.0061
9.1.6, Island A/B (사전) / `c08`, `h01_*`	9	9	0.0004	0.0004
비대칭 6스피커 (사전) / `h02_asym6.jsonl`	6	12	0.0045	0.0062

4.3 Elevation (3D)

9.1.6에서 측정 전에 고정한 E1(식 6)은 p 4개 × e 10단계에서 n = 106, RMS 0.0145 dB, 최대 0.0271 dB였고 활성 집합 40/40이 일치했다. 문서 문구("가장 가까운 세 스피커 사이를 거리로 보간")에서 만든 E2(1/d DBAP)는 RMS 5.87 dB, 최대 29.0 dB로 기각됐다. 홀드아웃 결과는 §7에 정리했다.

4.4 딜레이

`/ext/config/src/(k)/delay/enable`은 OSC로 바뀌지 않았다(`delay/mode`는 바뀜). UI에서 Delay를 켜자 Total Delay 30.0 ms(dynamic, d = 1)가 표시됐지만, 출력 오디오에는 지연이 없었다. static 12 ms도 같았다. 따라서 이 Processor Desktop 구성에서 출력 딜레이는 0이고, 관측되는 지연은 식 (3), (5) 필터의 위상뿐이다. 식 (8)의 잔차는 w = 0 전체 1,712출력에서 RMS 0.020, 최대 0.136 샘플이다. 동적 딜레이 매핑(DynamicDelayMax = 30 ms)은 관측할 수 없었다(§9).

4.5 그룹 속성

양쪽 그룹의 VirtualDistance를 7 → 14로, MaxGainGradient를 6 → 12로 바꾼 사본에서 Pan, Distance(d = 0..1), Width 29조건을 측정했다. 원본 대비 최대 차이는 0.0000 dB였다. 2D 직접음 경로(게인, HF, Width)에는 두 속성 모두 관여하지 않는다. 리버브, Spatial Fill, 3D에서의 역할은 측정 범위 밖이다.

5 순서 대조

2D (Red Rocks, c06). 같은 좌표에서 UUID, 이름, XML 순서, 그룹 내 순서, 그룹 순서, 출력 번호를 모두 바꿨다. 사전 예측은 n = 54, RMS 0.0037 dB, 최대 0.0061 dB였다. 원본 측정과 출력 매핑 후 직접 비교하면 Width를 포함한 29조건의 최대 차이가 0.0000 dB다. 2D 렌더링은 스피커 정체와 순서에 의존하지 않는다.

3D (9.1.6·Island 파생, c11-c20). 공면 면의 삼각분할(§7)을 정하는 요소를 찾기 위해 한 번에 하나씩 바꾼 사본을 측정했다. 결과는 표 3과 같다. 3D에서는 스피커 정체(UUID)가 출력을 바꾼다. 2D와 다른 점이다.

표 3 3D 동점 해소 가설의 사전 시험(Elevation, 1 kHz)

사본(변경) / 예측 고정	가설	기록	출력 n	RMS dB	최대 dB	활성 불일치	판정
topsorder (Tops hwOut 섞음 + 그룹 역순) / 02:59	최소 hwOut	48	70	5.68	13.01	36	기각

사본(변경) / 예측 고정	가설	기록	출력 n	RMS dB	최대 dB	활성 불일치	판정
〃	원래 삼각분할	48	122	0.0137	0.0272	0	적합
topsrot (그룹 목록 회전) / 03:06	그룹 목록 첫 스피커	24	46	9.42	27.45	24	기각
〃	원래 삼각분할	24	71	0.0159	0.0270	0	적합
rename (LTF → "Z-⋯") / 03:10	이름 사전순 첫 스피커	24	46	9.42	27.45	24	기각
〃	원래 삼각분할	24	71	0.0159	0.0270	0	적합
mirror (모든 X 반전) / 03:15	식 (7) 기하(왼쪽-앞)	24	47	10.58	21.56	23	기각
〃	원래 스피커 쌍 유지	24	71	0.082	0.488	1	거의 적합
uuidswap (Tops UUID만 좌우 교환) / 03:42	대각선 유지	20	40	8.94	15.95	20	기각
〃	대각선이 UUID를 따름	20	60	0.0144	0.0253	0	**적합**
aimflip (Tops 조준각만 반전) / 03:42	대각선 유지	20	60	0.0144	0.0253	0	적합(조준각 무관)
Island B uuidperm (H1↔H4 UUID) / 03:49	**식 (7) UUID 점진 삽입**	48	144	**0.0158**	**0.0269**	0	**성공**
〃	UUID 무관(원래 대각선)	48	97	13.02	54.47	47	기각

XML 위치 기준은 기존 자료(9.1.6, Island B)에서 이미 기각됐다(RMS 7.0 / 10.5 dB). 식 (7)은 3D 9개 세션 중 8개를 최대 0.027 dB로 설명한다. 거울상 사본의 뒤쪽 혼합 사각형(Tops 2 + Rears 2) 1조건(e = 0.6, p = 0)만 예외이며 최대 0.49 dB다. 이 예외는 원인이 미확정이다(§9).

6 Width — 부분 식별

사전 예측 세 가지(연속 MDAP 전체폭/반폭, 비정규화 합)는 모두 실패했다(표 4). 사후 분석으로 다음을 확인했다.

1. 각 출력은 $N(f) \otimes (D_i + E_i \cdot z^{-24})$다. 0.5 ms(24샘플) 지연 탭이 있어 1 kHz의 홀수배에 노치/피크가 생기는데, 1 kHz 측정 대역이 정확히 그 위에 있다. 조건마다 (셸프비 1개 + D_i, E_i)로 적합하면 55조건 전체에서 0.15 dB 이내다.
2. 퍼짐의 지지 구간은 [θ − 30°·w, θ + 30°·w]다. Red Rocks, 조밀 원호, 7.5° 원호의 모든 스피커 등장 임계값과 일치한다.
3. E의 부호는 방위 순서상 스피커 짝/홀을 따르고, 크기는 $s = 0.70 \cdot |a_i - a_j|$(a는 θ 쌍의 진폭 정규화 VBAP)다. 소수 parity 그룹은 E/D = ±s, 다수 그룹은 ΣE = 0이 되도록 축소된다. Red Rocks p = 0.44/0.3/0.1에서 예측 −0.0396/−0.0416/−0.0164 대 측정 −0.0396/−0.0417/−0.0163, θ가 쌍 중앙이면 E = 0이다.
4. 5° 조밀 원호(hw ≥ 12°)에서 D는 θ, θ±10°k 격자와 ±hw 가장자리의 가상 소스 합으로 0.001 이내에 적합된다(가중치 1/0.615/0.318/0.241). 그러나 Red Rocks에는 같은 가중치가 맞지 않는다(c20 = 0.25-0.37).
5. 셸프 정규화 비는 D의 $\|\cdot\|_1/\|\cdot\|_2$(최대 0.53 dB 차)로도 D±E 전력(0.86-0.91 dB 차)으로도 정확히 나오지 않는다.

표 4 Width 관련 사전 시험

예측 / 원자료	대상	기록	출력 n	RMS	최대	판정
W1 전체폭 MDAP / `c03_width.jsonl`	1 kHz dB	55	216	4.62 dB	22.29 dB	실패
W2 반폭 MDAP / 〃	1 kHz dB	55	216	10.63 dB	43.63 dB	실패
W3 비정규화 합 / 〃	1 kHz dB	55	216	4.47 dB	21.70 dB	실패
W*(c05 사후 도출) / `c14_width_dense10.jsonl`	정규화 D	30	—	—	0.096	부분
W* 〃	E_i/D_i	30	—	—	0.50 (θ = 0: 0.005)	부분
Width 무시 대조(무작위 50) / `r50_*.jsonl`	1 kHz dB	50	120	7.4-10.6 dB	42.9 dB	실패

7 사전 예측 결과 (실패 포함)

표 5 측정 전에 고정한 예측(전체 목록은 `data/validation_tables.md` 표 B)

시험	고정 시각	내용	출력 n	RMS dB	최대 dB	결과
c02 Red Rocks Pan H1	00:38	1 kHz	99	0.139	0.199	구조 적중, 0.1 dB 미달
c03 Width W1-W3	01:02	1 kHz	216	≥4.47	≥21.7	실패
c04 동적 딜레이 30 ms·d	01:02	딜레이	—	—	—	실패(딜레이 미적용)
c05 조밀 16스피커 Pan	01:24	1 kHz	40	0.0031	0.0058	성공
c06 순서·ID 교체	02:01	1 kHz	54	0.0037	0.0061	성공
c07 VD 14 / MGG 12	02:01	1 kHz	108	0.0037	0.0061	성공
c08 9.1.6 Pan / Elev E1 / Dist	02:17	1 kHz	186	≤0.0145	0.0271	성공 (E2 기각)
H1 Island A (홀드아웃)	02:28	Pan / Elev / Dist	85	≤0.0162	0.0255	**성공**
H1 Island B (홀드아웃)	02:28	Pan / Dist	58	0.0034	0.0062	**성공**
H1 Island B (홀드아웃)	02:28	**Elevation**	86	**10.53**	**54.44**	**실패**(활성 24/40 불일치)
H2 비대칭 6스피커	02:28	Pan / Dist	92	0.0034	0.0062	**성공**
무작위 w=0 (RR 30 + 9.1.6 20)	02:41	1 kHz	120	0.0081	0.0228	성공
c11-c13 3D 동점 해소	02:59-03:15	Elevation	표 3			후보 4개 기각
c14 Width W*	03:34	D, E/D	—	—	0.50	부분
c18 UUID 교환 / c19 조준각 반전	03:42	Elevation	120	0.0144	0.0253	UUID 의존 확인, 조준각 무관
c20 Island B UUID 교환 (식 7)	03:49	Elevation	144	0.0158	0.0269	**성공**

Island B 실패. 높이 스피커 4개는 좌우 대칭 등변 사다리꼴이라 볼록껍질 윗면이 정확한 공면 사각형이 된다(부피 0). 예측은 대각선 H2-H4, L-ISA는 H1-H3을 썼고, e ≥ 0.5에서 측정값이 예측의 좌우 거울상이었다. 처음 세운 기하 규칙(왼쪽-앞 부채꼴)은 거울상 사전 시험에서 기각됐다. 이후 UUID 교환(c18)으로 UUID 의존을 확인했고, 그로부터 세운 식 (7)이 홀드아웃 기하를 UUID만 바꾼 사본에서 사전 예측으로 성공했다(c20, 144출력 최대 0.027 dB). 원래 Island B 홀드아웃 자체는 실패로 기록하며, 식 (7)로 사후 재현할 때 110출력 최대 0.026 dB다.

운영 기록. 홀드아웃·비대칭 예측 파일이 02:41에 import 부작용으로 다시 쓰였다. 입력 파일(`model.py` 02:17, 예측 스크립트 02:28:39, HF 표 01:52)이 바뀌지 않아 값은 동일하며, 각 파일의 `audit` 필드에 남겼다.

8 논의와 모델의 적용 한계

- 직접음 코어(식 1-6, 8)는 기하만으로 정해진다. 2D에서 순서·ID 의존이 없다는 점은 AFC 연구(Speaker ID 재배정으로 분포가 바뀜)와 대조적이다. 학습하지 않은 배치 다섯 종(조밀 원호, 순서 교체, 9.1.6, Island A, 비대칭)에서 사전 예측 오차가 0.03 dB 이내였다.
- 사전 예측 성공은 w = 0에 한정된다. 공면 다각형이 있는 3D 배치에서 출력은 스피커 UUID에 의존한다. 같은 배치라도 세션을 새로 만들면(UUID가 새로 생성되면) 대각선이 바뀔 수 있다. 식 (7)은 사각형 면에서 사전 검증됐지만, 5각형 이상의 공면 면과 혼합 그룹 면(거울상 예외 1건)은 검증 근거가 약하다.
- 식 (3)의 f_c, Q와 식 (4)의 계수는 Red Rocks 한 배치에서 사후 적합했다. 이후 모든 배치에서 사전 예측으로 유지됐으므로 배치 독립 상수로 본다. 식 (5)의 a(d), b(d)는 표이며, d 격자(0.05) 사이 보간 오차는 측정하지 않았다(무작위 d 120출력 최대 0.023 dB가 간접 근거다).
- 측정은 디지털 전기 경로의 정적 전달함수다. 청취 평가나 실내 음향이 아니다. 1 kHz 대역 게인은 Width의 빗살 구조에 매우 민감하므로, Width 결과는 1/3옥타브 전체(`data/measurements.csv`)로 함께 해석해야 한다.
- 게인 분포만으로 내부 위치가 유일하게 식별되지 않는 경우를 피하려고, 비율 역산(방향 1e-4°)과 주파수 응답(셸프 형태)을 독립 증거로 썼다. 그래도 Width의 D 커널은 Red Rocks의 스피커 3개로는 유일하게 정해지지 않았다(격자 간격 8-12°가 모두 정확히 맞음).

9 미확정 모듈

모듈	확인된 사실	미확정 부분	경계(수치)
Width (w > 0)	2탭(0, 24샘플) 구조, 지지 구간 ±30°·w, E 부호(방위 parity)와 크기 규칙, 쌍 중앙 E = 0	D 분포 커널(일반 배치), w > 0 셸프 정규화, E 규칙의 일반 배치 적용	Width 무시 시 최대 42.9 dB. W* 사전: D 분포 0.096, E/D 0.50
공면 면 삼각분할 (3D)	UUID 의존(c18), hwOut·XML·그룹 순서·이름·위치·조준각 무관. 식 (7) 사각형 사전 성공(c20)	5각형 이상 면의 규칙, 거울상 혼합 사각형 예외 1건	예외 최대 0.49 dB. 대각선을 잘못 고르면 최대 54.4 dB
입력 딜레이 (static/dynamic)	OSC enable 무효, UI ON에서도 출력에 지연 없음	다른 Processor(하드웨어)에서의 동작, 동적 매핑	출력 딜레이 0 ± 0.14 샘플
HF 감쇠 계수 a(d), b(d)	1차 극-영점, 나이퀴스트 −20 dB @ d = 1	닫힌 형태	표 보간, 적합 ≤ 0.014 dB
VirtualDistance, MaxGainGradient	직접음 2D 경로 영향 0.0000 dB	리버브, Spatial Fill, 3D 경로	—

10 결론

L-ISA Processor v3.2.2의 직접음 렌더링은 원점 기준 2D/3D VBAP와 주파수 의존 정규화 셸프, 3차 다항 거리 게인, 1차 HF 필터로 기술된다. 이 모델은 측정 전에 고정한 예측으로 새 배치 다섯 종과 w = 0 무작위 조합에서 0.03 dB 이내였다. 종료 조건 1(무작위 50조합, Width 포함)은 Width 미확정으로 충족하지 못했다. 종료 조건 2는 Island A와 비대칭 배치에서 충족했지만, Island B Elevation이 공면 면 동점 해소로 54 dB 실패해 충족하지 못했다. 이 실패의 원인은 이후 사전 시험으로 확정했다(UUID 내림차순 점진 삽입, c20 성공). Width는 구조(2탭 디코릴레이션, 지지 구간, E 규칙)까지만 식별했고, 미확정 모듈로 경계를 남겼다. 실험은 20사이클 한도에서 종료했다. 다음 단계는 비균등 조밀 배치 여러 개로 Width의 D 커널과 w > 0 정규화를 분리하는 것, 그리고 5각형 이상 공면 면(예: 육각형 Tops)에서 식 (7)을 시험하는 것이다.

자료와 재현성

경로	내용
`model.py`	레퍼런스 구현: `load_layout`, `gains_1k`, `response`, `delays` (w > 0은 예외)
`validate.py`	원자료 전체에서 표 A(사후)·표 B(사전)를 다시 계산 → `data/validation_tables.md`
`data/measurements.csv`	출력별 행(21,520행): 세션, 템플릿, 2D/3D, 팬 범위, 원점, 그룹(Usage/VD/MGG), p w d e s와 물리값, 스위치, 실제 UI 딜레이 상태, 버전, 스피커 좌표, 게인, 딜레이, 1/3옥타브
`data/raw/*.jsonl`, `data/irs/*.npy`	캡처별 원자료와 시험 소스 IR
`predictions/*.json`	측정 전 고정 예측(생성 시각, model.py sha1 포함)
`sessions/`	측정 세션 사본과 파생 세션, 출력 매핑 JSON
`tools/rig.py`, `tools/measure_session.py`	측정. `tools/predict_*.py`: 예측 고정. `tools/a0*_*.py`: 사후 분석
`NOTES.md`	사이클별 기록(가설, 예측 파일, 측정 파일, 잔차, 결론)

재현 순서는 다음과 같다. 세션을 로드하고(UI) → `tools/predict_*.py`로 예측을 고정하고 → `tools/measure_session.py <tag>`로 측정한 뒤 → `python validate.py`를 실행한다. 측정 전 runtime 상태로 Source 1·2의 PWDES OSC 제어권, reverb off, (가능하면) reverb master mute가 필요하며 `rig.Rig`가 소스 스위치를 적용한다.