

5

Il sistema Vertical Array

“Coloro che sono soliti giudicare con il sentimento non comprendono nulla circa le questioni di pura ragione, poiché vogliono penetrare subito tutto con un sol colpo d’occhio e non sono avvezzi alla ricerca dei principi. Gli altri, invece, ossia quelli che sono abituati a ragionare mediante i principi logici, non comprendono nulla delle cose del sentimento, cercando in esse dei principi logici, e non sapendo perciò vedere le realtà sentimentali con la facoltà dell’intuito.”

Blaise Pascal

In questo capitolo viene descritto il sistema line array. A partire dalle cause che hanno creato la necessità di questo sistema, all’analisi degli effetti generati dalla struttura, fino alle problematiche incontrate nel progetto di un sistema reale.

5.1 INTRODUZIONE

Nella realizzazione di un sistema professionale sono svariati i compromessi ai quali il progettista deve trovare soluzione, bilanciando le caratteristiche di qualità del suono finale con il budget e la complessità della struttura. Nel caso particolare di sonorizzazione di ampi spazi, siano essi al chiuso o all’aperto, le richieste si fanno più stringenti e i punti dal quale il designer può partire sono i seguenti:

- Numero di canali. Tipicamente due, ma esistono applicazioni in cui ne sono presenti in maggior numero, come nei cinema o in concerti con effetti surround.
- Range di frequenza. A seconda del materiale riprodotto si potrebbe avere la necessità di riprodurre solo un ristretto range di frequenze, come ad esempio il range vocale, o l’intero spettro musicale.
- Massimo livello sonoro. La richiesta di un determinato livello sonoro legata alla distanza alla quale lo si vuole ottenere pone un grande limite nella potenza minima o nella direttività del sistema.

- Estensione dell'area da sonorizzare. La forma e la dimensione dell'area da coprire determinano le caratteristiche di direttività e potenza necessarie al sistema.
- Trasportabilità. Se il sistema non è installato stabilmente, ma va di volta in volta spostato nel luogo da sonorizzare, le caratteristiche di trasportabilità e maneggevolezza diventano determinanti. In particolare il peso e le dimensioni andrebbero contenute il più possibile.
- Budget disponibile.

Quando l'area da sonorizzare è ampia e c'è una richiesta sul livello minimo di pressione sonora, per esempio per avere una buona intelligibilità e sovrastare il rumore di fondo, un solo diffusore di dimensioni e peso trasportabili non è sufficiente. Le limitazioni imposte dalla massima pressione sonora ottenibile prima di incorrere in elevati tassi di distorsione o di raggiungere i limiti termici o di escursione dei driver di fatto richiedono una struttura alternativa. A parità di tecnologia, la soluzione più immediata è quella di aumentare il numero di sorgenti, in modo tale da suddividere l'area coperta, e quindi la potenza e la pressione da gestire, su più altoparlanti.

5.2 L'ARRAY IDEALE

Determinata l'area da sonorizzare questa può essere idealmente suddivisa in settori singolarmente coperti dalla radiazione di una sorgente a matrice. Nel caso particolare di radiazione a point source i singoli elementi della matrice vengono allineati a formare la superficie di una porzione di sfera, avente come centro il centro acustico della sorgente puntiforme virtuale e di dimensioni tali da coprire l'area prefissata.

L'idealità di questa soluzione sta nelle singole sorgenti: teoricamente hanno una direttività costante per tutta la banda riprodotta e una risposta piatta all'interno dell'angolo solido coperto.

Affiancando questi moduli si affiderebbe la sonorizzazione di ogni singolo settore ad una sola sorgente e la direttività costante permetterebbe un accoppiamento senza reciproche interferenze.

La potenza acustica verrebbe suddivisa tra i vari moduli e si aggirerebbero le limitazioni di dinamica e tenuta in potenza degli altoparlanti componenti la struttura.

Nel caso di array lineare verticale si opererebbe una simile suddivisione dell'area da sonorizzare; i moduli si spartirebbero verticalmente l'angolo solido da coprire, mentre la radiazione orizzontale rimarrebbe costante e pari a quella del singolo elemento.

La radiazione di questa struttura privilegia la sonorizzazione di aree profonde o complesse sul piano verticale e i vantaggi ottenibili in termini di suddivisione di potenza sono comparabili a quelli della matrice.

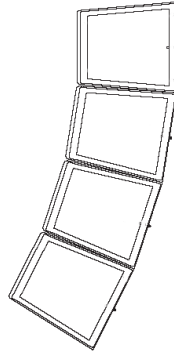


Fig. 5.1: struttura array verticale

5.3 L'ARRAY REALE

Partendo dal presupposto che nella realtà è impossibile creare sorgenti tanto direttive da poter essere affiancate per una buona copertura dello spazio senza avere interferenze, si ha la necessità di analizzare gli effetti causati dalla sovrapposizione delle radiazioni.

Lo studio può partire dal caso ideale di un array composto da sorgenti omnidirezionali, il cui comportamento fu già analizzato da Beranek [21]; estendendo i risultati di questa configurazione si può analizzare il caso di sorgente lineare ideale.

Avvicinandosi al caso reale Heil [22], nel primo articolo di analisi di sorgenti sonore strutturate ad array, descrive un sistema di sorgenti rettangolari a fronte d'onda piano, e a partire da questo caso vengono introdotte delle condizioni sull'udibilità dei lobi secondari che si vengono a creare dalla sorgente di dimensioni finite; infine, il caso di un array composto da sorgenti rettangolari a fronte d'onda curvo, la situazione che più si avvicina ai prodotti reali.

5.3.1 ARRAY DI SORGENTI SEMPLICI

L'analisi di Beranek prende in considerazione il caso di n sorgenti identiche, omnidirezionali, in fase ed equamente distanziate con passo b .

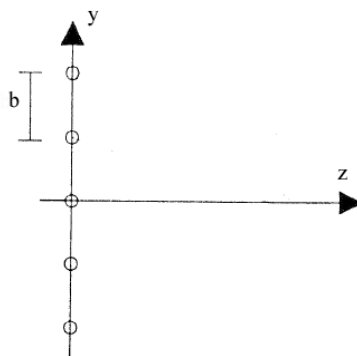


Fig. 5.2: struttura dell'array di sorgenti semplici

La dimensione totale dell'array diviene $d = (n - 1) \cdot b$, e l'equazione che descrive la pressione acustica ad una distanza r dal centro dell'array (tale che d sia piccolo rispetto a r) è la seguente:

$$p = \frac{n \cdot A_s}{r} \cdot \left| \frac{\sin[(n \cdot \pi \cdot b/\lambda) \cdot \sin \theta]}{n \cdot \sin[(\pi \cdot b/\lambda) \cdot \sin \theta]} \right|,$$

dove θ rappresenta l'angolo formato dal punto di misura rispetto all'asse ortogonale all'array e λ la lunghezza d'onda.

La condizione $r \gg d$ serve ad indicare una condizione di campo lontano, in questo caso la pressione sonora decresce linearmente con la distanza lungo una linea radiale che parte dalla sorgente; per avere ciò devono essere soddisfatte due condizioni: l'estensione totale d della sorgente deve essere piccola rispetto alla distanza r , e r^2 deve essere grande rispetto a $\lambda^2/36$.

Una semplice formula che esprime la distanza limite tra il campo vicino e il campo lontano è la seguente:

$$r_n = \frac{d^2 \cdot f}{2 \cdot c},$$

dove d rappresenta l'estensione totale dell'array e c la velocità del suono.

Se per esempio si calcola la distanza limite nel caso di un array alto 4 m per una frequenza di 100 Hz, si trova $r_n = 2.32$ m; questo significa che per le basse frequenze ogni ipotetico ascoltatore in una tipica sonorizzazione professionale si troverebbe in condizioni di campo lontano e varrebbero quindi i risultati tratti dall'analisi del caso di array di sorgenti semplici. Ancor di più dato che per le frequenze interessate la dimensione fisica dei trasduttori è piccola rispetto alla lunghezza d'onda riprodotta, e questo garantisce la radiazione omnidirezionale di ogni singolo altoparlante.

5.3.2 SORGENTE LINEARE DI LUNGHEZZA FINITA

Partendo dal caso di n sorgenti equispaziate da una distanza b , si può arrivare all'analisi della sorgente lineare di lunghezza finita incrementando il numero di sorgenti e diminuendo la loro spaziatura.

In questa situazione la relazione che descrive la pressione acustica ad una distanza r dall'array è la seguente:

$$p = p_0 \cdot \left| \frac{\sin[(\pi \cdot d/\lambda) \cdot \sin \theta]}{(\pi \cdot d/\lambda) \cdot \sin \theta} \right|,$$

dove p_0 rappresenta il modulo del valore efficace della pressione alla distanza r dall'array e ad un angolo $\theta = 0$. Anche in questo caso l'estensione dell'array $d = (n - 1) \cdot b \cong n \cdot b$ è piccola rispetto alla distanza di misura r .

La differenza principale tra un array di pochi elementi e il caso estremo di sorgente continua di dimensione finita risiede nel controllo attuato sui lobi secondari: a parità di rapporto tra la lunghezza dell'array e la lunghezza d'onda incrementando il numero di sorgenti la radiazione diviene più direttiva, l'intensità dei lobi secondari viene quindi attenuata.

5.3.3 ARRAY DI SORGENTI RETTANGOLARI A FRONTE D'ONDA PIANO

Il caso di array lineare costituito da sorgenti rettangolari a fronte d'onda piano viene analizzato nel dettaglio in un articolo di Heil [22]; i parametri caratteristici di questa configurazione sono la distanza $STEP$, tra una sorgente e la successiva e le dimensioni di ogni radiatore (di altezza H e larghezza W).

Lo studio viene effettuato tramite simulazioni separate per il campo vicino ed il campo lontano, che nell'articolo, mediante analogie con l'interferenza ottica, vengono soprannominati rispettivamente regione di Fresnel e regione di Fraunhofer; nella prima zona si ha una forte interferenza tra le sorgenti, l'energia sonora decresce ad un ritmo di 3 dB per ogni raddoppio della distanza (e da qui nasce l'analogia con la radiazione cilindrica), ma non ha senso parlare di direttività o risposta in frequenza essendo una regione molto instabile. Nella regione di Fraunhofer, invece, si può analizzare il comportamento dell'array mediante curve polari e studi di direttività, la propagazione diviene di tipo sferico e l'energia sonora decresce ad un ritmo di 6 dB per raddoppio di distanza.

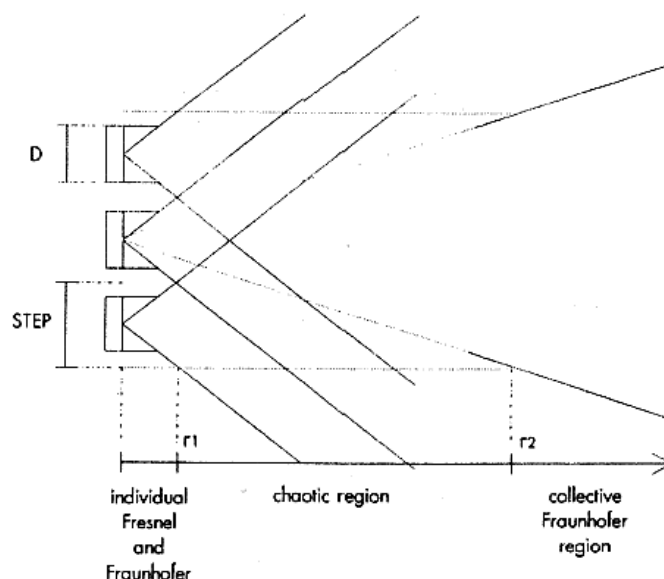


Fig. 5.3: suddivisione delle regioni di Fresnel e Fraunhofer

Dalle simulazioni effettuate risulta che non è definibile una distanza limite tra le due regioni, ma che è presente una zona di transizione, chiamata regione caotica, nella quale la pressione sonora e la dispersione assumono valori non facilmente predicibili.

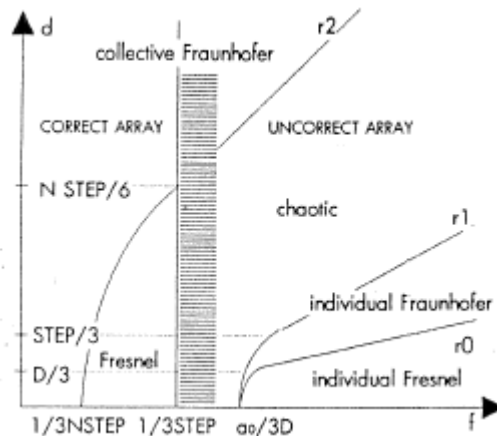


Fig. 5.4: linee di bordo tra le regioni di Fresnel, caotica e di Fraunhofer in funzione della distanza e della frequenza

Nell'articolo vengono stabilite delle condizioni di *arrayability* per il sistema considerato:

- Assenza della regione caotica.
- Livello massimo dei lobi secondari inferiore di -12 dB rispetto al livello del lobo principale.

L'idea è di controllare l'energia irradiata fuori dal lobo principale cercando non di annullarla, ma di porre un limite ricavato mediante un compromesso tra realizzabilità fisica e udibilità del fenomeno. In questo modo nascono delle regole di progettazione:

- Nel caso in cui $f < (1/3) \cdot STEP$ non si ha la formazione di lobi secondari sulla dimensione fisica dell'array.
- Nel caso in cui $f > (1/3) \cdot STEP$ si hanno lobi secondari, ma per limitare il livello massimo basta porre $D/STEP > 0.8$.

La seconda condizione può essere vista come un coefficiente di riempimento, dato che esprime il rapporto tra la superficie attiva dell'array rispetto alla superficie totale.

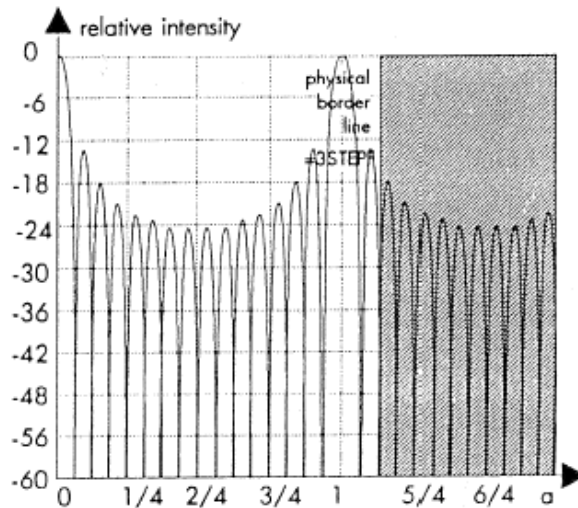


Fig. 5.5: dispersion e andamento dei lobi secondari

Viene anche fatto notare che nel caso di sorgenti circolari questa condizione non può essere verificata: anche affiancando le sorgenti si otterrebbe un coefficiente di riempimento minimo di

$$\frac{2 \cdot D/\pi}{STEP} = \frac{2 \cdot D/\pi}{D} = \frac{2}{\pi} = 0.64,$$

cioè maggiore di 0.8, che è la condizione fissata.

5.3.4 ARRAY DI SORGENTI RETTANGOLARI A FRONTE D'ONDA CURVO

Creando un array in cui le alte frequenze vengono riprodotte da trombe a bocca rettangolare l'ipotesi di avere fronti d'onda piani decade. Dovendo percorrere traiettorie di lunghezze differenti dalla gola alla bocca della tromba, si può ipotizzare che il fronte d'onda sia incurvato di raggio pari alla lunghezza della tromba stessa.

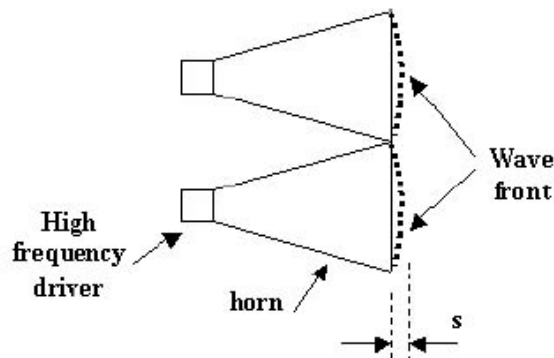


Fig. 5.6: curvatura dei fronti d'onda alla bocca delle trombe

Fresnel pone una condizione sulla curvatura massima del fronte d'onda nel campo lontano: $s < \lambda/2$, lunghezza d'onda della massima frequenza che si vuole riprodurre correttamente.

La condizione è già molto restrittiva, nel caso la si voglia rispettare per una frequenza massima di 16 kHz la curvatura dovrebbe essere inferiore a 1 cm.

Heil [23] effettua delle simulazioni partendo da questa condizione: si può osservare un netto incremento del livello di pressione sonora dei lobi secondari alle alte frequenze e un comportamento caotico nel campo vicino, purtroppo questo accade a partire da frequenze inferiori a quella limite fissata con la regola di Fresnel.

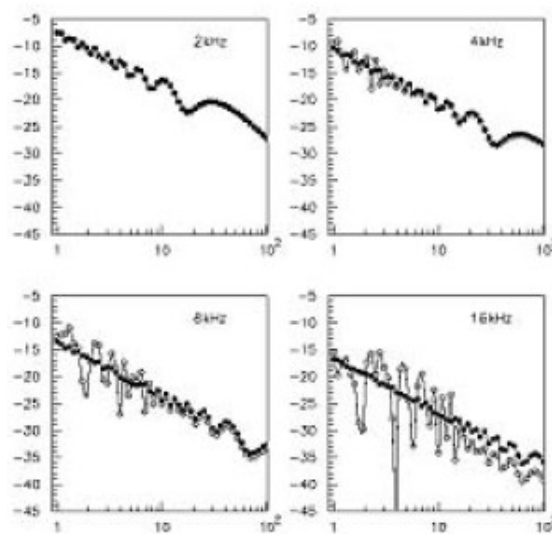


Fig. 5.7: SPL in funzione della distanza per diverse frequenze nel caso di sorgente lineare e array a fronti d'onda curvi (curvatura $s = 1$ cm, condizione di Fresnel per 16 kHz)

La soluzione proposta da Heil consiste nel modificare la condizione di Fresnel per renderla più restrittiva: il nuovo limite da rispettare diviene $s < \lambda/4$, riferendosi sempre alla lunghezza d'onda della massima frequenza che si vuole riprodurre mantenendo un comportamento noto.

Anche Ureda [24] analizza il caso di sorgenti a fronte d'onda curvo, le sue simulazioni confrontano la dispersione in campo lontano di un array formato da 3 trombe affiancata da 15 cm aventi una curvatura alla bocca di $1/8$, $1/4$ o $1/2$ della lunghezza d'onda della frequenza considerata.

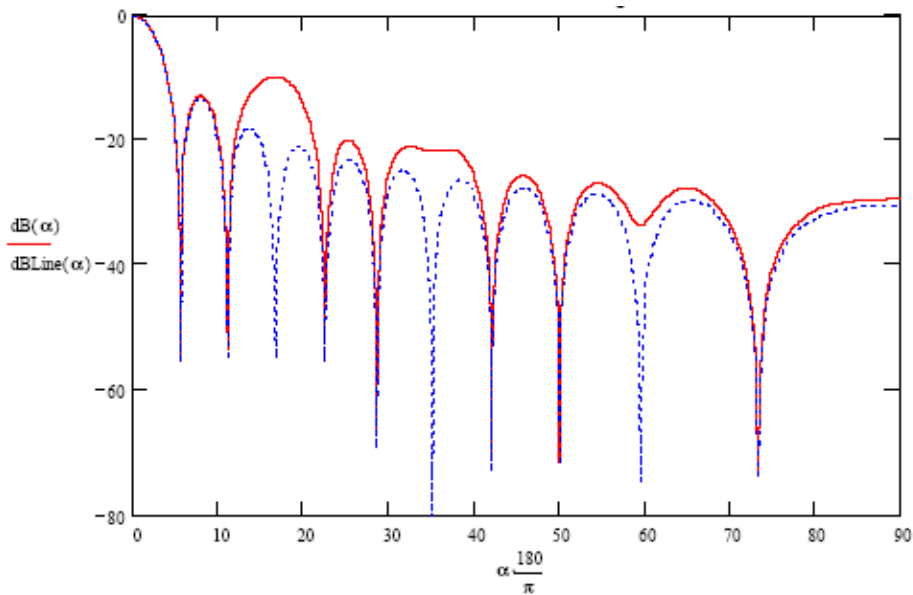


Fig. 5.8: dispersion per una curvatura dei fronti d'onda di $\lambda/4$ (in rosso) a confronto con la dispersione di una sorgente lineare di pari altezza

Come Heil, la condizione a cui arriva per mantenere l'ampiezza dei lobi secondari ridotta rispetto al lobo principale è quella di limitare la curvatura del fronte d'onda di ogni sorgente a $\lambda/4$.

5.4 L'ARRAY CURVO

Fino a qui è stato trattato il caso di array verticale dritto, e quali caratteristiche devono avere le sorgenti reali per poter eguagliare l'analisi del sistema alla radiazione di una sorgente lineare.

Ma il punto di partenza era il cercare di realizzare una struttura capace di suddividere l'angolo solido di radiazione, e quindi la potenza, tra vari moduli.

Dove può venire utilizzato l'array dritto?

Nelle normali sonorizzazioni la posizione reciproca tra fruitori dell'evento musicale e sorgente non necessita dell'alta direttività di un array dritto, ma di una curvatura sempre maggiore spostandosi verso i moduli bassi del sistema; in tal modo si utilizza in maniera efficiente l'elevata direttività verticale delle singole sezioni e ci si riporta così al concetto di array ideale.

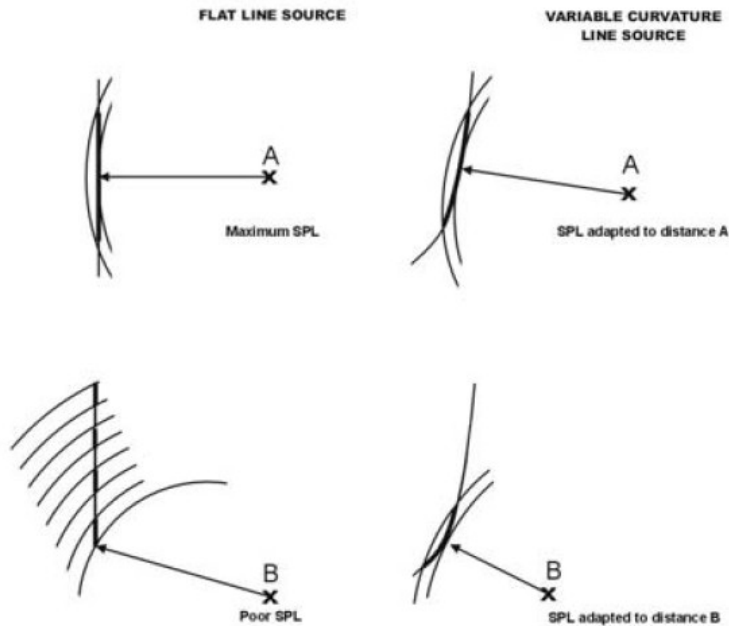


Fig. 5.9: confronto grafico tra le soluzioni ad array dritto e array curvo

Varie ricerche sono state effettuate per analizzare il comportamento di vari tipi di curvatura e l'effetto causato in termini di variazione di energia sulla superficie da sonorizzare; Heil, nell'articolo riguardante lo studio sulla "Wavefront sculpture technology" [23], confronta le due soluzioni di array dritto e array a curvatura crescente: l'analisi ha avuto come obiettivo una uniforme distribuzione dell'energia sull'area da sonorizzare e come parametro l'angolazione reciproca dei moduli dell'array.

Un caso notevole analizzato dal ricercatore consiste nel fissare il prodotto tra l'angolazione α del modulo i -esimo e la distanza d tra il modulo stesso e la zona da sonorizzare sul suo asse: così facendo si ottiene un'espressione dell'intensità sonora avente una dipendenza $1/d$, cioè con una decrescita di 3 dB per ogni raddoppio della distanza. Questo comportamento non viene mantenuto su tutto lo spazio antistante l'array, ma solo nell'area da sonorizzare, per questo motivo al campo è stato dato il nome di pseudo-cilindrico.

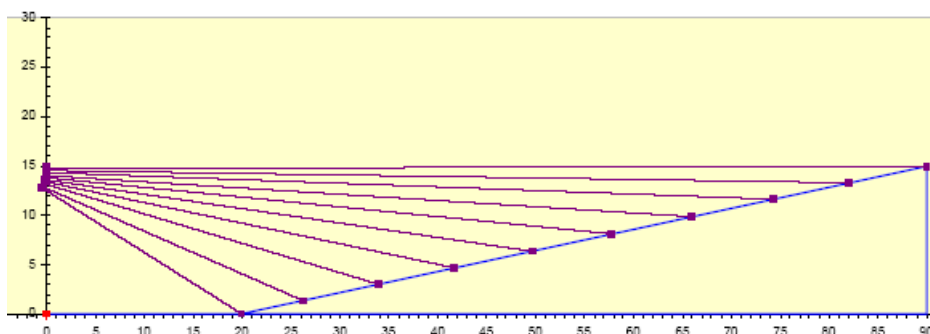


Fig. 5.10: angolazione dei moduli suggerita da Heil

C'è però da considerare un limite a questa procedura: aumentando l'angolazione reciproca α tra i moduli si arriva ad un valore in cui si perde la sovrapposizione della radiazione di moduli adiacenti e si ha la formazione di lobi. Ogni sorgente ha un proprio campo vicino la cui estensione dipende dalle sue dimensioni e dalla frequenza in analisi, e se il fronte d'onda generato è piano una qualsiasi angolazione crea zone non coperte, zone in cui l'energia è molto bassa. Superata questa distanza le radiazioni tendono a perdere la loro idealità e si ritorna al caso di fronti d'onda curvi.

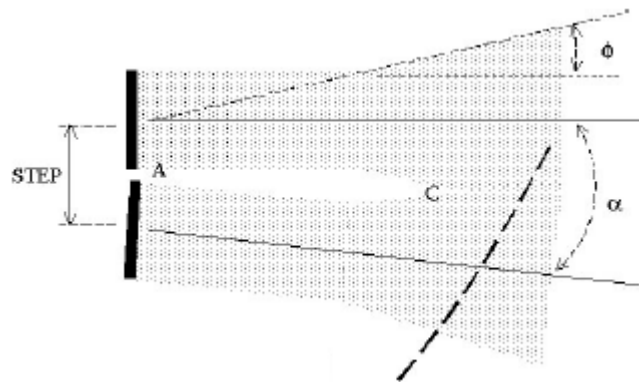


Fig. 5.11: campo vicino ottenuto con moduli angolati

La distanza di campo vicino pone quindi un limite nel massimo angolo imponibile tra i moduli se l'obiettivo è una uniforme copertura.

Definito l'*active radiating factor* $ARF = D/Step$, dove D rappresenta la dimensione verticale di una singola sorgente, e ricavato Φ , l'angolo di apertura della radiazione in campo lontano, Heil ottiene la condizione limite

$$\alpha < \frac{2}{3 \cdot f_{\max} \cdot ARF \cdot Step} - \frac{Step}{d}$$

dove α è in radianti, f_{\max} in kHz, e d rappresenta la distanza tra il sistema e l'ascoltatore.

5.5 SOLUZIONI COMMERCIALI

Interessante a questo punto osservare le soluzioni adottate dalle varie case costruttrici per la realizzazione pratica di vertical array. In particolare, è utile analizzare come ogni produttore ha risolto o aggirato le problematiche generate dalla riproduzione delle alte frequenze in sistemi line array.

5.5.1 SISTEMA V-DOSC DI L-ACOUSTICS

Il primo prodotto commerciale ad implementare le teorie analizzate da Heil è il sistema V-Dosc, da lui progettato. La sezione delle alte frequenze cerca di soddisfare il requisito di avere sorgenti piane occupanti almeno l'80% dell'altezza dell'array: un driver da 1.4" viene accoppiato ad una guida capace di raccogliere il suo fronte d'onda alla gola e, tramite percorsi di lunghezza costante, diffonderlo alla bocca costituita da una stretta fessura che simula il comportamento di un driver a nastro.

La sezione delle basse frequenze invece soddisfa il requisito di avere una distanza tra i vari radiatori inferiore a $\lambda/3$.

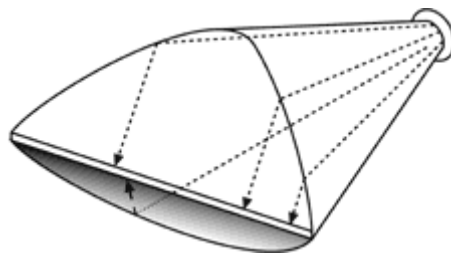


Fig. 5.12: struttura della guida d'onda di L-Acoustics

5.5.2 SISTEMA VERTEC DI JBL

Il primo sistema vertical array creato da JBL utilizza i moduli VT4889. La sezione che riproduce le alte frequenze è composta da tre driver accoppiati alle rispettive guide d'onda poste in verticale, tecnologia a cui è stato dato il nome di Wave Former.

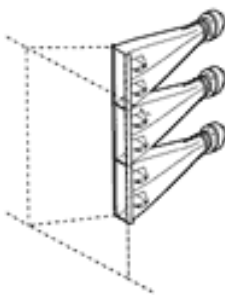


Fig. 5.13: struttura del Wave Former di JBL

L'attenzione che è stata dedicata a questa sezione è testimoniata dall'uso del berillio per la costruzione delle cupole dei driver (materiale più rigido e leggero rispetto all'alluminio e al titanio utilizzati comunemente, questo permette di incrementare le frequenze in cui intervengono i breakup della membrana, ottenendo un comportamento controllato e conosciuto fino alle frequenze

superiori) e dall'inserimento nel traferro di ferrofluido (olio isolante utilizzato per migliorare la trasmissione del calore dalla bobina al complesso magnetico).

La sezione che riproduce le frequenze medie è composta da 4 midrange da 8" posti ad irradiare dietro i pannelli costituenti la tromba delle alte frequenze; questi sono caricati da guide d'onda che evitano riflessioni con l'emissione principale della via alta.

Nel sistema si è fatto un uso estensivo di magneti in neodimio al posto di quelli in materiale ceramico, in questo modo si è ottenuto un netto abbassamento del peso totale, fattore determinante per la sospensione e la trasportabilità dei moduli.



Fig. 5.14: foto del modulo VT4889 del sistema Vertec

5.5.3 SISTEMA X-LINE DI ELECTRO-VOICE

Si tratta di un vero e proprio sistema, composto da diversi modelli studiati specificatamente per le varie parti dell'array.

I moduli per le medio – alte frequenze sono infatti di due tipi:

- Xvls ha il contenitore a forma di parallelepipedo, ha una dispersione orizzontale di 90° ed è quindi progettata per lavorare nella parte alta dell'array, la sezione a più lunga gittata.
- Xvlt ha il contenitore trapezoidale, una dispersione di 120° ed è quindi progettata per lavorare nella parte bassa dell'array, dove i moduli hanno un'inclinazione reciproca e la vicinanza all'area da sonorizzare richiede una dispersione maggiore.

Anche nella sezione che riproduce le alte frequenze del sistema X-Line viene fatto uso di un driver caricato da una guida d'onda denominata Hydra.

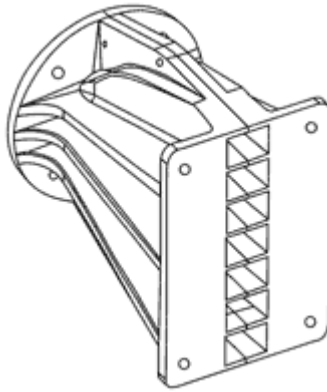


Fig. 5.15: guida d'onda Hydra

5.5.4 SISTEMA M3D DI MEYER

Il sistema M3D della Meyer fa uso di moduli per basse frequenze a radiazione cardiode: combinando la radiazione di woofer posti frontalmente e posteriormente ai diffusori ed opportunamente processati nel livello e nella fase relativa si riesce ad attenuare significativamente il disturbo causato dalla radiazione posteriore alla cassa. In questo modo si riduce il livello sonoro sul palco, migliorando il comfort degli artisti e diminuendo le problematiche di feedback acustico.

Per le alte frequenze si fa uso di una guida d'onda denominata REM (Ribbon Emulation Manifold) che, a detta della casa, riesce a mantenere percorsi più contenuti sul percorso dell'onda sonora, diminuendo così l'aumento di distorsione causato da lunghi percorsi ad alta pressione.

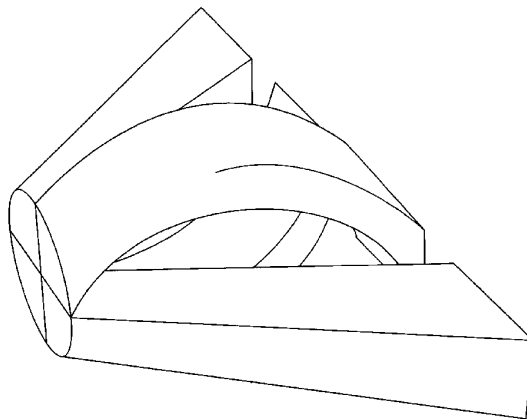


Fig. 5.16: schema semplificato della guida d'onda REM

5.5.5 SISTEMA LISA

Il sistema Lisa (Line Source Array) utilizza per la riproduzione delle alte frequenze dei trasduttori a nastro; questi, per loro costituzione, sono assimilabili a sorgenti rettangolari a fronte d'onda piano. La leggerezza delle loro membrane e la distribuzione della forza sulle stesse permette di utilizzare grandi superfici senza le limitazioni dei breakup ad alta frequenza.

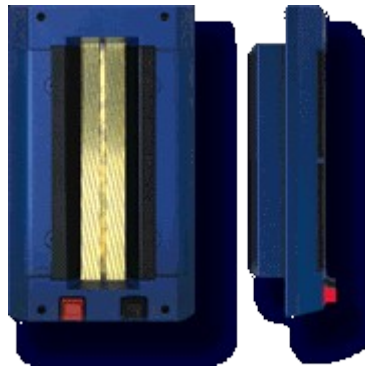


Fig. 5.17: driver a nastro che equipaggia il sistema Lisa

Questo tipo di trasduttore non è utilizzato in altri sistemi a favore dei driver a compressione per il suo limite di pressione sonora raggiungibile, limite valicato dal prodotto in questione mediante particolari come l'uso di magneti in neodimio e un accorto disegno della membrana.

Altre caratteristiche del sistema sono il caricamento a tromba dei midrange e l'utilizzo di 2 woofer da 18" per modulo, il che rende l'impianto full-range.

5.5.6 SISTEMA Y-AXIS DI ADAMSON

Il sistema Y-Axis di Adamson utilizza un sistema brevettato di caricamento della via medio - alta: un driver a compressione viene montato dietro il medio e le loro radiazioni vengono unite da un sistema a guide d'onda e trombe.

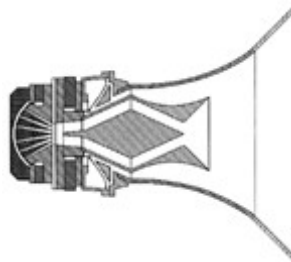


Fig. 5.18: struttura dei medio – alti Adamson

Il sistema è denominato Ribbon Array Manifold e permette quindi di avere i centri d'emissione dei due altoparlanti coincidenti.

5.5.7 SISTEMA BUTTERFLY DI OUTLINE

Il sistema Butterfly di Outline utilizza dei driver a compressione caricati da una particolare guida d'onda. Questa è composta da due parabole che riflettono il suono proveniente dal driver fino alla

bocca rettangolare mantenendo percorsi di pari lunghezza. In questo modo si cerca di ottenere alla bocca un fronte d'onda piano.

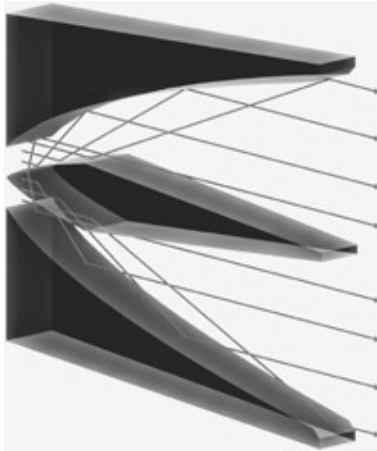


Fig. 5.19: schema delle riflessioni nella guida d'onda delle Butterfly