

CONTRIBUCIÓN AL ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LAS VARIABLES METEOROLÓGICAS EN LA PROPAGACIÓN DEL SONIDO EN EXTERIORES.

REFERENCIA PACS: 43.28 Fp

M. Arenal¹; J. González¹; P. González¹; A. Tarrero².

1 Dpto. de Física Aplicada de la ETS de Arquitectura.

2 Dpto. de Termodinámica y Física Aplicada de la E.U.P.

Universidad de Valladolid.

Avenida de Salamanca s/n.

47014 Valladolid. España

Tel: 34 983 423 446.

E-mail: arenal@opt.uva.es, juliog@opt.uva.es, pgarias@opt.uva.es, ana@sid.eup.uva.es

ABSTRACT

Experimental data of outdoor propagation above a plane boundary, which impedance is known, have been analyzed at distances up to 105m of the acoustic source. Simultaneous measurements of some meteorological parameters are introduced in theory of ray tracing to show the presence of a refractive shadow zone. The aim of this work is to bring data to determine the reliability of some models to detect shadow zones and to determine ranges of applicability of some of them.

RESUMEN

En este trabajo se analizan datos experimentales obtenidos en una campaña de medidas realizada con el fin de estudiar la propagación sonora a distancias inferiores a 105m, en un medio sin obstáculos y en presencia de un suelo de impedancia conocida. Simultáneamente a la toma de datos acústicos se midieron los valores de las variables meteorológicas que, introducidas en la teoría de rayos, determinaban la presencia de una zona de sombra. Nuestro objetivo fundamental es aportar datos para valorar la fiabilidad de los modelos a la hora de predecir zonas de sombra a la vez que tratar de abundar en seleccionar criterios para diferenciar rangos de aplicación de algunos de ellos.

INTRODUCCIÓN

Tal y como se pone de manifiesto en la bibliografía que trata esta materia, determinar la propagación sonora en exteriores, con unas condiciones reales generales, resulta muy complejo. Aún no existe un modelo que permita predecir con toda exactitud los valores de los niveles en puntos alejados de la fuente. Los estudios realizados contribuyen con nuevos datos y sugerencias a optimizar resultados pero no aportan una formulación definitiva. En muchos casos, de interés práctico, el sonido se propaga en regiones cercanas a una superficie horizontal y plana (el suelo) como es el caso que nos ocupa; bajo estas hipótesis, se han desarrollado modelos teóricos que describen matemáticamente el fenómeno en un grado de aproximación aceptable.

Además de la presencia del suelo, los condicionantes principales que influyen en la propagación del sonido en las inmediaciones de la superficie terrestre para el caso un suelo liso y sin elementos que puedan producir reflexiones o difracciones, son los que imponen las variables meteorológicas. En las zonas próximas a la superficie de la tierra, es decir en la capa límite, la atmósfera no se comporta como un medio homogéneo pudiendo considerarse dividida en capas horizontales en las que los valores de las variables meteorológicas son generalmente diferentes para cada capa produciéndose gradientes, positivos o negativos, e incluso cambiar de signo en intervalos de tiempo relativamente breves, sobre todo para el caso de la temperatura y velocidad del viento. Estas variaciones de las variables en altura hacen que el medio atmósfera no sea homogéneo sino refractivo y, en consecuencia, los rayos sonoros no siguen una trayectoria rectilínea sino que se curvan con concavidad diferente dependiendo del signo del gradiente. Cabría pensar que la influencia del suelo, en la propagación, es un hecho independiente del efecto que produce la atmósfera pero no es exacto, ya que, cuando los rayos sonoros son curvados de nuevo hacia la superficie, se reflejan en ella repetidamente originando una guía de ondas y, por tanto, el sonido se propagará a lo lejos y se escuchará a grandes distancias. Si por el contrario los rayos son desviados hacia arriba, su curvatura, junto con la presencia del suelo, pueden crear lo que se conoce como zona de sombra sonora (figura 1). Aun en estos casos de curvatura de los rayos con concavidad hacia arriba, que crean zonas de sombra a nivel del suelo, se produce cierta aportación de energía, hacia el suelo, por efecto de la difracción de los rayos y el *scattering* originado por la turbulencia atmosférica ([4] y [9]). El primero sería importante en las frecuencias más bajas del espectro sonoro y el segundo en las más altas. En la figura 1 se pretende reflejar este fenómeno mediante las flechas que representan el sonido indirecto.

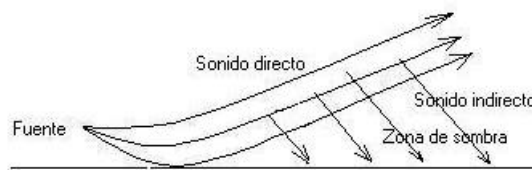


Fig. 1: Esquema que representa la creación de una zona de sombra y la introducción de sonido indirecto por difracción y *scattering* producido por la turbulencia atmosférica.

En este trabajo desarrollamos el análisis de una serie de datos obtenidos de forma experimental en comparación con los aportados en campañas de medidas realizadas en otros puntos y con los deducidos a partir de los modelos que se exponen en la bibliografía específica que trata esta materia. Nosotros centraremos la atención en encontrar las zonas de sombra previstas en ciertos modelos y en afianzar los límites de distancia en los que los modelos aportan resultados fiables, de forma particular el caso del modelo de Daigle.

MODELOS TEÓRICOS

Debido a la multitud de factores que intervienen en el proceso, la descripción completa de la propagación sonora en medios refractivos es muy compleja, especialmente en el caso de presentarse el fenómeno de creación de zonas de sombra.

A la hora de estudiar el problema se emplean diferentes técnicas para intentar llegar a una predicción numérica. Una de las tendencias actuales es la simulación numérica de la que los trabajos [6] y [8] son un claro ejemplo. Los resultados son comparados con datos tomados por Parkin y Scholes, quienes realizaron un estudio experimental muy exhaustivo, llegando a la conclusión de que el nivel de presión sonora (siempre relativo a un micrófono que se toma como referencia) presenta una silueta de forma muy concreta como aparece en la figura 2. En ella observamos tres regiones bien diferenciadas:

- La primera, en la que el nivel de presión sonora es prácticamente una línea horizontal, las únicas variaciones son las producidas por las interferencias entre la onda directa y reflejada.
- La segunda región de transición en donde el nivel cae bruscamente hasta situarse en unos valores entre -10 dB y $-$

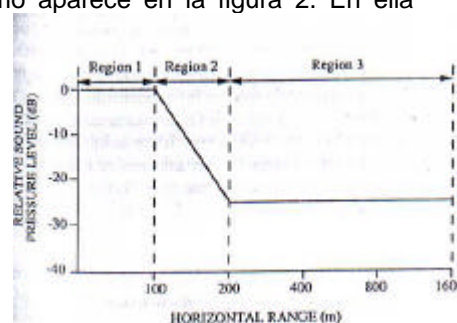


Fig. 2: Patrón característico del nivel de presión relativo en una zona de sombra (figura tomada de [6]; cf. también con figura 16 de [5]).

30 dB aproximadamente. El comienzo de esta caída marca el inicio de la zona de sombra.

- La tercera región, donde el nivel de presión sonora permanece prácticamente constante, nos indica que ya hemos alcanzado plenamente la sombra sonora. Como hemos mencionado, la energía que penetra en esta región es debida a los fenómenos de difracción y *scattering* de la turbulencia atmosférica.

Teoría de Rayos

Se trata entonces de determinar a que distancia de la fuente se encuentra la región de sombra. Para ello se utiliza la teoría de rayos, que en nuestro caso lo hemos desarrollado siguiendo a V. E. Ostashev y aparece descrito en [10]. Partiendo de la ecuación eikonal, para un medio en movimiento, y a través de las ecuaciones de Hamilton, llega a una expresión que describe la propagación en tres dimensiones de los rayos sonoros. Si la adaptamos al caso en el que la velocidad del viento en la dirección vertical es nula, obtenemos, para el vector de posición de la trayectoria de energía en el espacio la expresión:

$$\vec{r} = \vec{r}_1 + \int_{z_1}^z \frac{\vec{a} + (\mathbf{w} - \vec{a} \cdot \vec{v})\vec{v}}{c\mathbf{c}} dz'$$

Esta ecuación es de la forma funcional $\vec{r} = \vec{r}(z)$, en donde \vec{r} representa las componentes horizontales (x,y) de la curva en un punto situado a una altura z del suelo. El subíndice 1 hace referencia al punto en donde se sitúa la fuente, que como veremos más adelante en nuestro caso concreto es (0,0,1)m. \vec{a} es la proyección del vector \vec{k} en el plano xy (horizontal), \vec{v} representa la velocidad del viento que consideramos horizontal, c es la velocidad del sonido, \mathbf{w} la frecuencia angular y \mathbf{c} viene dada por $\mathbf{c} = \pm \sqrt{(\mathbf{w} - \vec{a} \cdot \vec{v})^2 - c^2 a^2}$, eligiendo el signo positivo para desplazamientos de la energía en el sentido ascendente del eje z y el negativo para los descendentes. El eje x del sistema de referencia elegido coincide con la proyección en el suelo de la dirección inicial de la energía sonora, que suponemos igual en todos los rayos. Los otros dos ejes, son elegidos perpendiculares a x y entre sí, y siempre tomando el eje z perpendicular al suelo. Para calcular el ángulo inicial α de partida del rayo sonoro con el eje x utilizamos la ecuación:

$$\sin \alpha = \frac{c\mathbf{c}}{\sqrt{(\mathbf{w} - \vec{a} \cdot \vec{v})[(c^2 + v^2)\mathbf{w} + (c^2 - v^2)\vec{a} \cdot \vec{v}]}}$$

En la referencia [10] esta ecuación es denominada ley de refracción (ley de Snell) y como se puede observar, sólo se utiliza para encontrar la relación entre el parámetro \vec{a} y el ángulo inicial de la energía sonora, no para la deducción de las trayectorias de los rayos por medio de una integración (método que D. Hohenwarter et al. utilizan en [2] para expresiones que denominan leyes de Snell). Lo importante que queremos destacar es que los rayos sonoros se curvan y por tanto es necesario tenerlo en cuenta al estudiar la propagación del sonido.

Dado que existen modelos de propagación basados en el de Weyl - Van der Pol (por ejemplo el de Daigle, descrito en [3]), que no tienen en cuenta este fenómeno, es previsible que los datos experimentales no se adapten a los deducidos por los modelos en las zonas de sombra. Como es lógico, en estos casos, el nivel de presión sonora medido es generalmente inferior al predicho por la teoría. Con la teoría de rayos podemos predecir la presencia de estas zonas y determinar cuantitativamente a qué distancia de la fuente se producen y así, tratar de explicar las discrepancias del nivel de presión calculado por ciertos modelos con el medido experimentalmente. El nivel de presión sonora empleado en los modelos siempre será relativo a un micrófono, que es el que se tomará como referencia:

$$L(P) - L(ref) + 20 \log \left(\frac{r_p}{r_{ref}} \right)$$

en donde el primer término es el nivel en el punto de medida P y el segundo el nivel del punto elegido como referencia. Los radios vectores r_p y r_{ref} representan las distancias de la fuente a los puntos de medida P y de referencia respectivamente. Con el último término eliminamos la caída en el nivel de presión sonora por efecto de la distancia en los frentes esféricos. Esta ecuación será utilizada tanto para datos experimentales como teóricos.

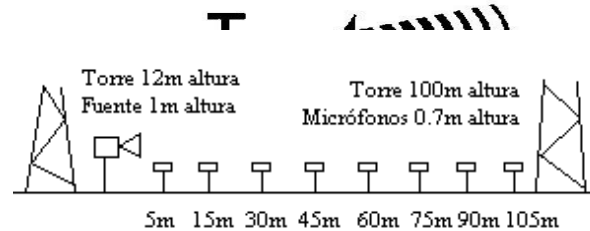


Fig. 3: Esquema que representa la colocación de micrófonos y fuente así como la posición relativa de las torres meteorológicas.

DISEÑO EXPERIMENTAL

El muestreo ha sido realizado en el CIBA (Centro de Investigación de la Baja Atmósfera) situado en el término municipal de La Mudarra (Valladolid). Los datos meteorológicos se han tomado de dos torres meteorológicas de 12 y 100 metros de altura. Los valores obtenidos resultan de promediar durante cinco minutos los valores instantáneos medidos en cada una de las torres.

Para la toma de datos acústicos se utilizó un conjunto de siete micrófonos B&K Type 4129 directamente conectados a un multiplexor B&K Type 2811, el cual, enviaba los datos a un analizador B&K Type 2143, en donde se grababan y analizaban en bandas de tercios de octavas. También se utilizó un analizador B&K Type Investigator 2236, situado a 5m de la fuente sonora (altavoz B&K Type 4224) y a una altura de 0.7m. Los micrófonos se colocaron a la misma altura y separados de la fuente en intervalos de 15 m hasta los 105 m. La magnitud analizada es el nivel continuo equivalente sin ponderación, promediado en cinco minutos de muestreo y simultáneamente se tomaban los datos meteorológicos. En la figura 3 se representa un esquema de la configuración del montaje experimental.

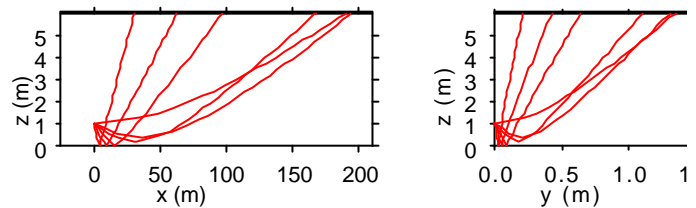


Fig. 4: Proyecciones de las trayectorias de los rayos sonoros en los diferentes planos coordenados para los perfiles de velocidad del viento y del sonido medidos.

ANÁLISIS DE LOS DATOS: RESULTADOS.

Con los datos meteorológicos medidos en el instante de efectuar el muestreo se ajustan modelos logarítmicos para los perfiles de velocidad del sonido y del módulo de la velocidad del viento [6], obteniéndose:

$$c(z) = 347.165 - 0.307 \ln(z)$$

$$v(z) = 2.397 + 0.359 \ln(z)$$

La velocidad del viento forma un ángulo de unos 65° con el eje x . Para el ajuste de c , suponemos a la atmósfera como un gas ideal seco (sin vapor de agua). Bajo estas condiciones meteorológicas, que conducen a los perfiles señalados, va a suceder que los rayos sonoros se curvan hacia arriba originando zonas de sombra a ciertas distancias de la fuente, debido a la temperatura. Esto lo observamos claramente en la figura 4, en donde representamos las proyecciones de los rayos sonoros en cada uno de los planos coordenados. La desviación de los rayos por efecto de la dirección del viento en el plano xz no es importante en el rango de distancias medido (hasta 105m), sólo de unos centímetros (plano xy de la figura 3). Por ello nos centramos en la desviación producida en el plano xz , en el que observamos una primera zona, aproximadamente hasta unos 32m en la que existe reflexión de los rayos en la superficie del suelo. Correspondería con la primera zona de la figura 2. Su límite viene determinado por el rayo

que es tangente al suelo. Una segunda zona, hasta unos 75m aproximadamente, en la que a 0.7m de altura sobre el suelo, (situación de los micrófonos), cierta energía refractada llega sin previa reflexión en el suelo. Podríamos considerar esta zona como la región de transición de la figura 2. A partir de esta distancia, se puede observar una perfecta zona de sombra que correspondería a la tercera región. En esta última zona la energía que penetra no se puede predecir por la teoría de rayos, ya que es debida a los fenómenos de difracción y *scattering*.

Las distancias predichas concuerdan en gran medida con los datos experimentales. En la figura 5 representamos el nivel de presión para las frecuencias de 400, 1250 y 4000 Hz. La referencia tomada es el micrófono situado a 5m de la fuente. Para el resto de frecuencias analizadas la silueta de las curvas presenta una forma similar, típica de una zona de sombra (cf. figura 2). Hasta unos 30m aproximadamente, el nivel de presión permanece muy próximo a 0 dB, con las únicas variaciones posibles debidas a la interferencia del rayo directo y reflejado. A continuación, el nivel decae bruscamente hasta llegar a una meseta en donde el nivel de presión vuelve a ser prácticamente constante. La distancia de la fuente a la que se produce es alrededor de 75 m, siendo más claro en las curvas de frecuencia 1250 y 4000 Hz.

Por tanto, concluimos que la influencia de la temperatura es crucial para la creación de la zona de sombra. Con el mismo perfil para la velocidad del viento y manteniendo los mismos criterios que en el caso anterior, presentamos la Tabla I que describiría de manera aproximada el límite de la primera región de las figuras 2 y 5 en función de $c(z)$, siempre y cuando las disposiciones geométricas de los micrófonos sean similares. Los perfiles de c utilizados son habituales según [9].

$c(z)$:	Distancia (m)
347.165-0.15ln(z)	77
347.165-0.2ln(z)	58
347.165-0.307ln(z)	32
347.165-0.5ln(z)	20
347.165-ln(z)	14

Tabla I: Tabla con la distancia límite en la que se producen las reflexiones de los rayos sonoros en el suelo para unas condiciones meteorológicas que podemos considerar habituales

Para finalizar comprobaremos la adecuación del modelo de Daigle con estos condicionantes derivados de la presencia de zonas de sombra. Todos los datos son ajustados con una resistividad al flujo σ de 95 kNsm^{-4} y los parámetros turbulentos necesarios son la varianza del índice de refracción $15 \cdot 10^{-6}$ y la longitud de correlación $L=1.1\text{m}$ ([1] y [7]). Destacar que la contribución a esta fluctuación en el índice de refracción es fundamentalmente mecánica (debido a las variaciones de la velocidad del viento). Como cabe esperar según la teoría de rayos, en distancias superiores a 30m este modelo no será adecuado.

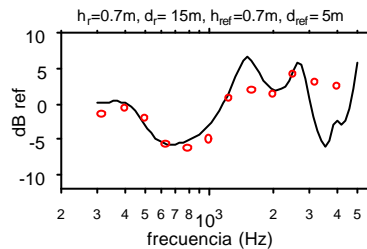


Fig. 6

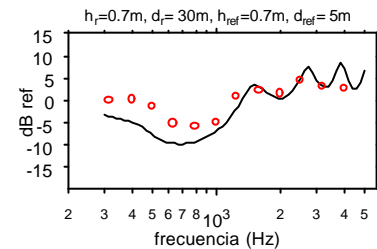


Fig. 7

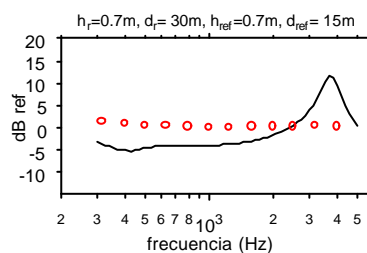


Fig. 8

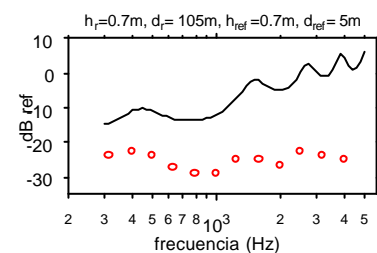


Fig. 9

Gráficos representando el nivel de presión sonora relativo según el modelo de Daigle para diferentes disposiciones geométricas y distancias.

En Fig. 6, representamos el valor de presión sonora de referencia a una distancia de 15m. El ajuste que encontramos es bastante bueno (excepto para las altas

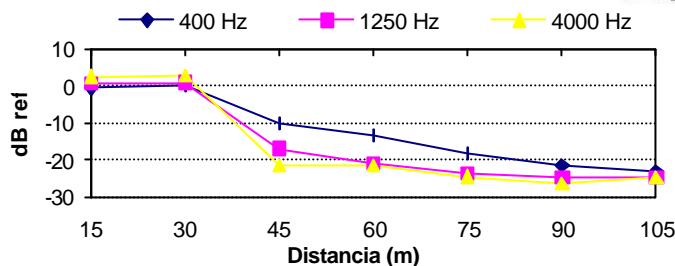


Fig. 5.-Representación de la variación de la presión sonora con la distancia en una zona de sombra para el caso de tres frecuencias.

frecuencias [7]). Aquí todavía los rayos sonoros se reflejan en el suelo, condición indispensable para aplicar el modelo de Daigle. Fig. 7 corresponde al límite de las reflexiones (primera región en la figura 4), ya que, a partir de una distancia de unos 30m, los rayos no llegan a la superficie (véase figura 3). En este caso la adecuación de las bajas frecuencias ya no es tan buena aunque sí del mismo orden de magnitud. Si comparamos los micrófonos situados a 15 y 30m de la fuente (figura 8), obtenemos resultados del mismo orden de magnitud, pero al igual que el caso anterior, no existe un buen ajuste en todo el rango de frecuencias. Finalmente al aumentar la distancia, la diferencia entre el modelo teórico y experimental puede ser de hasta 25 dB como se deduce de la figura 9, en la que el micrófono está situado a 105m de la fuente. Por tanto, no podemos utilizar el modelo de Daigle o similares (nos referimos a los basados en modelos de Weyl - Van der Pol) en distancias superiores a esa primera región en donde se producen las reflexiones en el suelo. Además, si la teoría es utilizada en la zona límite, la adecuación es sólo del orden de magnitud, en ningún momento la podemos considerar adecuada.

CONCLUSIONES

Este es un trabajo se pone de manifiesto la importancia de los factores meteorológicos en la propagación sonora en exteriores. En él comparamos datos medidos experimentalmente con modelos existentes en la bibliografía. Los resultados en la predicción de la posición de la zona de sombra coinciden cualitativa y cuantitativamente, por lo que el sistema empleado se puede utilizar para asegurarnos de la presencia de estas zonas de sombra y sobre todo, a través de la teoría de rayos, estudiar qué factores meteorológicos las originan.

El modelo de Daigle (u otros basados en el modelo de Weyl - Van der Pol), es aplicable sólo en una cierta distancia, que puede ser calculada según la teoría de rayos (siempre de una forma aproximada) a través del rayo tangente al suelo. La Tabla I que presentamos en este trabajo nos puede servir de ayuda. En la zona límite el ajuste no es perfecto y sólo tendremos en cuenta el orden de magnitud.

Finalmente, si queremos aplicar este tipo de modelos de propagación, y no disponemos de unas medidas meteorológicas bastante completas, no parece aceptable separar los micrófonos de la fuente sonora más de unas pocas decenas de metros, que se corresponden a condiciones atmosféricas que podemos considerar como habituales, al menos para posiciones de la fuente y micrófonos situados en las proximidades del suelo.

AGRADECIMIENTOS

Queremos manifestar nuestro agradecimiento a los responsables del CIBA, Laboratorio de Técnicas Instrumentales de la Universidad de Valladolid y a la Dra. Sánchez Gómez, del Departamento de Física Aplicada I (Universidad de Valladolid), por los datos e instrumentos aportados para la elaboración de este trabajo, que se ha financiado con fondos de la CICYT.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- [1] A.M. Abascal, J. González, A. Tarrero, M. Arenal: "Estudio de la impedancia acústica del suelo" XXX Jornadas Nacionales de Acústica, Encuentro Ibérico de Acústica, Tecniacústica Ávila 1999.
- [2] Dieter Hohenwarter, Frieddrich Jelinek: "Snell's law of refraction and sound rays for a moving medium." ACUSTICA - acta acustica **86** (2000) 1-14.
- [3] G. A. Daigle.: "Effects of atmospheric turbulence on the interference of sound waves above a finite impedance boundary." J. Acoust. Soc. Am. **65** (1) (1979) 45-49.
- [4] G. A. Daigle. T. F. W. Embleton, J. E. Piercy: "Propagation of sound in the presence of gradients and turbulence near the ground." J. Acoust. Soc. Am. **79** (3) (1986) 613-627.
- [5] J. E. Piercy, T. F. W. Embleton, L. C. Sutherland: "Review of noise propagation in the atmosphere." J. Acoust. Soc. Am. **61** (6) (1977) 1403-1418.
- [6] Kenneth E. Gilbert, Richard Raspert, Xiao Di: "Calculation of turbulence effects in upward-refracting atmosphere." J. Acoust. Soc. Am. **87** (6) (1990) 2428-2437.
- [7] M. Arenal, J. González, P. González: "Contribución al estudio de la propagación del sonido en exteriores". XXX Jornadas Nacionales de Acústica, Encuentro Ibérico de Acústica, Tecniacústica Ávila 1999.
- [8] P. Chevret, Ph Blanc-Benon, D. Juvé: "A numerical model for sound propagation through a turbulent atmosphere near the ground" J. Acoust. Soc. Am. **100** (6) (1996) 3578-3599.
- [9] Tony. F. W. Embleton: "Tutorial on sound propagation outdoors." J. Acoust. Soc. Am. **100** (1) (1996) 31-48.
- [10] Vladimir E. Ostashev: "Acoustics in moving inhomogeneous media." E & FN SPON, an Imprint of Thompson Professional 1997.