

4

Canal Espaço-Temporal

Neste capítulo serão apresentados os conceitos básicos para se entender o comportamento do canal espaço-temporal.

4.1

Variabilidade do Canal sem Fio

Em um sistema sem fio, o sinal transmitido através do canal interage com o ambiente de uma maneira complexa. Existem reflexões em objetos, difração da onda em torno do objeto e espalhamento do sinal. Essas interações complexas são responsáveis pelas variações do sinal recebido.

O efeito do canal sobre o sinal pode ser estudado sob dois aspectos: pequena escala, analisando o efeito do canal sobre janelas do sinal da ordem de dezenas de comprimento de onda, e larga escala, analisando o efeito do canal sobre janelas do sinal da ordem de centenas de comprimento de onda.

A variabilidade em larga escala pode ser estudada em relação a dois aspectos: a variação do valor mediano do sinal em função da distância receptor-transmissor, dado pela dependência direta da energia recebida no receptor com a distância deste para o transmissor, e o desvanecimento deste valor mediano dentro de uma mesma distância, ocasionado pelo sombreamento provocado por obstáculos naturais.

A variabilidade em pequena escala se dá pelas mudanças bruscas da amplitude e fase do sinal para pequenas variações da distância receptor-transmissor. Esta variabilidade é ocasionada principalmente por três fatores: a dispersão do sinal, a variabilidade temporal do canal e a dispersão espacial do canal.

A dispersão do sinal é ocasionada pela multiplicidade de sinais que chegam ao receptor percorrendo caminhos diferentes, cada um com sua amplitude, seu retardo temporal e seu ângulo de chegada. No receptor estes sinais se combinam vetorialmente, ocasionando pontos de sinais fortes ou de sinais fracos. Dependendo da disposição entre estes obstáculos espalhadores, como também da disposição das antenas transmissoras e receptoras, estes sinais poderão ser correlatados ou descorrelatados entre si.

O fenômeno do multipercurso causa uma dispersão ou espalhamento temporal do sinal transmitido. Este espalhamento é medido por parâmetros como o retardo médio, desvio padrão de retardo e banda de coerência.

A dispersão do sinal é sentida no domínio da frequência por uma distorção no espectro de frequência. A seletividade em frequência está relacionada com a dispersão do sinal. Assim em outras palavras, o fenômeno do multipercurso poderá afetar da mesma forma todas as frequências dentro da faixa de transmissão do sinal (desvanecimento plano) ou afetar diferentemente as frequências dentro da faixa passante (desvanecimento seletivo em frequência). Apesar da seletividade em frequência ser um aspecto prejudicial do canal, esta pode ser utilizada por outros sistemas sem fio para melhorar a qualidade do sinal através de técnicas bem específicas.

A variabilidade temporal do canal se dá pela mobilidade relativa entre o transmissor e o receptor e da variabilidade do ambiente ao redor do transmissor e do receptor. Desta forma, o mesmo sinal transmitido em diferentes instantes de tempo, pode originar diferentes sinais no receptor, sofrendo uma distorção temporal ocasionada pela variabilidade temporal do canal.

Quando o desvanecimento do canal é constante para uma transmissão realizada dentro de um período de tempo, ele é denominado de desvanecimento lento. Quando o desvanecimento sofre variação, afetando de modo seletivo a transmissão neste período de tempo, ele é denominado de desvanecimento rápido. No domínio da frequência este fenômeno é sentido por um espalhamento do espectro de frequência, denominado de espalhamento ou desvio Doppler.

A seletividade espacial do canal mostra que a amplitude do sinal depende da localização espacial da antena. Enquanto a seletividade em frequência é resultado da dispersão temporal do canal, a seletividade espacial é causada pela direção de chegada dos multipercursos no espaço. No domínio angular este fenômeno é

refletido no espalhamento dos ângulos de chegada dos multipercursos no arranjo das antenas.

Por fim, é necessário apenas destacar que existe um grande número de modelos teóricos e empíricos que foram propostos para descrever a estatística do envelope do sinal e da sua fase, após o desvanecimento em pequena escala. Por sua simplicidade e pelos resultados satisfatórios verificados na prática, a caracterização do comportamento do envelope de um sinal pela distribuição estatística de Rayleigh, para a condição de sem visibilidade, e a distribuição estatística de Rice, para visibilidade, são as mais utilizadas. Em relação à fase, a estatística utilizada é a distribuição uniforme entre 0 e 2π [51].

4.2

Caracterização do Canal Espaço-temporal

A caracterização do canal é essencial para compreendê-lo e modelá-lo corretamente. Em princípio, o canal é determinístico. Entretanto, devido ao número enorme dos fatores que influenciam o canal, a caracterização determinística não é possível. A única maneira possível de caracterizar o canal é caracterizar as suas estatísticas.

A seguir serão discutidos diferentes métodos de caracterização do canal rádio móvel. Inicialmente, serão apresentadas as funções de correlação ou funções de Bello [7, 26], que são usadas freqüentemente para a descrição estatística dos canais SISO. Baseados nas funções de correlação, a condição de estacionaridade no sentido amplo e espalhadores descorrelatados (WSSUS) permitem simplificar a descrição estatística.

A descrição estatística do canal SISO através das funções de correlação também pode ser estendida para análise do canal espaço-temporal [29]. Será mostrado que o conceito de WSSUS pode ser também estendido em princípio para análise espaço-temporal.

4.2.1

Caracterização Determinística através das Funções de Bello

Assumindo linearidade, a descrição mais geral de um canal rádio móvel é dada por quatro funções denominadas funções de Bello [7, 26]. São elas:

- Resposta impulsiva variante no tempo ou função de espalhamento dos retardos, $h(t, \tau)$;
- Função de transferência variante no tempo $T(t, f)$;
- Resposta impulsiva Doppler variante ou função de espalhamento *delay-Doppler* $S(\nu, \tau)$;
- Função de transferência Doppler ou função de espalhamento Doppler $H(\nu, f)$;

A relação entre as funções através da transformada de Fourier é mostrada na Figura 11.

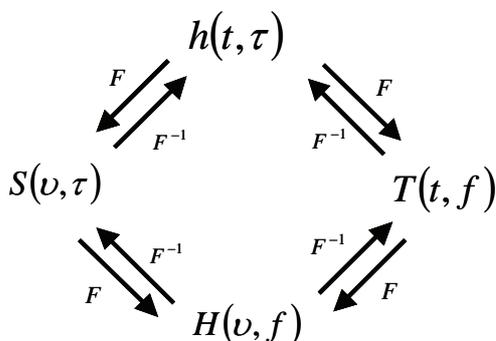


Figura 11 - Relação entre as funções de Bello

Usando a resposta impulsiva variante no tempo, a relação entre o sinal de entrada $s(t)$ e o sinal de saída $y(t)$ pode ser escrita como:

$$y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t, \tau) \cdot s(t - \tau) d\tau \quad (4)$$

A função resposta impulsiva variante no tempo ou a sua dual, função de transferência Doppler, descreve completamente o canal. Porém, um estudo mais realista do canal rádio revela que a obtenção das funções $h(t, \tau)$ e $H(\nu, f)$,

sujeitas apenas a duas variáveis determinísticas, não representam situações de canal na prática, visto que o canal em situações reais não são deterministicamente variante no tempo, sendo na realidade um canal que possui variação temporal de forma aleatória, que o torna um processo estocástico.

4.2.2

Caracterização Estocástica com Funções de Correlação

Uma descrição completa das estatísticas das funções de Bello é somente obtida pelas pdfs multidimensional delas, que também não é praticamente possível. Uma descrição, aproximada, frequentemente usada é caracterizar cada função de Bello através das estatísticas de primeira ordem (média) e de segunda ordem (correlação). A média é geralmente assumida ser zero já que os canais são puramente aleatórios e a correlações são dadas por:

$$R_h(t_1, t_2, \tau_1, \tau_2) = E\{h(t_1, \tau_1)h^*(t_2, \tau_2)\} \quad (5)$$

$$R_s(\nu_1, \nu_2, \tau_1, \tau_2) = E\{S(\nu_1, \tau_1)S^*(\nu_2, \tau_2)\} \quad (6)$$

$$R_T(t_1, t_2, f_1, f_2) = E\{T(t_1, f_1)T^*(t_2, f_2)\} \quad (7)$$

$$R_H(\nu_1, \nu_2, f_1, f_2) = E\{H(\nu_1, f_1)H^*(\nu_2, f_2)\} \quad (8)$$

De acordo com a transformada de Fourier entre as funções de Bello, existe uma transformada dupla de Fourier entre as funções de correlação, como mostra a Figura 12.

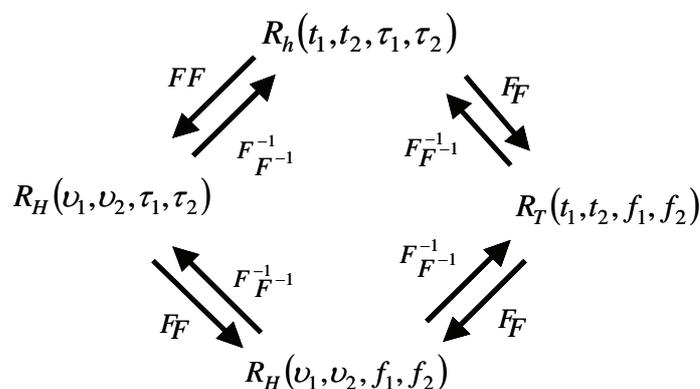


Figura 12 - Funções de correlações de Bello

4.2.3

Condição WSSUS

As funções de correlação de quarta dimensão apresentada seção anterior são ainda extremamente complexa para ser implementada na prática. Por esta razão, novas simplificações, tais como a condição de estacionaridade no sentido amplo (WSS) e espalhadores descorrelatados (US), são assumidas.

Um processo é dito estacionário no amplo com relação ao tempo quando a média e a autocorrelação são independentes do tempo. Isto significa, que a função correlação para um canal WSS depende apenas da diferença entre os tempos. A função correlação da função $h(t, \tau)$ e $T(t, f)$ para um canal WSS é dada por:

$$R_h(t_1, t_2, \tau_1, \tau_2) = R_h(\Delta t, \tau_1, \tau_2) \quad (9)$$

$$R_T(t_1, t_2, f_1, f_2) = R_T(\Delta t, f_1, f_2) \quad (10)$$

com $\Delta t = t_2 - t_1$. Utilizando as relações estabelecidas pela Figura 12, temos que:

$$R_S(v_1, v_2, \tau_1, \tau_2) = \delta(\Delta v) \int R_h(\Delta t, \tau_1, \tau_2) e^{-j2\pi\Delta tv} d\Delta t = P_S(v, \tau_1, \tau_2) \delta(\Delta v) \quad (11)$$

$$R_H(v_1, v_2, f_1, f_2) = \delta(\Delta v) \int R_T(\Delta t, f_1, f_2) e^{j2\pi\Delta tv} d\Delta t = P_H(v, f_1, f_2) \delta(\Delta v) \quad (12)$$

onde $\Delta v = v_2 - v_1$

e

onde P_H e P_S representam a densidade espectral de potência dos domínios $H(v, f)$ e $S(v, \tau)$ respectivamente. A função correlação da função $S(v, \tau)$ para um canal WSS indica que sinais com diferentes deslocamentos Doppler serão descorrelatados.

Para um canal com espalhadores descorrelatados, os multipercursos que apresentam retardos diferentes serão descorrelatados em amplitude. Canais US são estacionários no sentido no domínio da frequência. A função correlação da função $H(v, f)$ e $T(t, f)$ para um canal US é dada por:

$$R_H(\nu_1, \nu_2, f_1, f_2) = R_H(\nu_1, \nu_2, \Delta f) \quad (13)$$

onde $\Delta f = f_2 - f_1$

$$R_T(t_1, t_2, f_1, f_2) = R_T(t_1, t_2, \Delta f) \delta(\Delta \tau) \quad (14)$$

onde $\Delta \tau = \tau_2 - \tau_1$

Utilizando as relações estabelecidas pela Figura 12, temos que:

$$R_h(t_1, t_2, \tau_1, \tau_2) = \delta(\Delta \tau) \int R_H(\nu_1, \nu_2, \Delta f) e^{2\pi \Delta f \tau} d\Delta f = P_h(t_1, t_2, \tau) \delta(\Delta \tau) \quad (15)$$

$$R_S(\nu_1, \nu_2, \tau_1, \tau_2) = \delta(\Delta \tau) \int R_H(t_1, t_2, \Delta f) e^{2\pi \Delta f \tau} d\Delta f = P_S(\nu_1, \nu_2, \tau) \delta(\Delta \tau) \quad (16)$$

onde P_h e P_T representam a densidade espectral de potência dos domínios $h(t, \tau)$ e $T(t, f)$ respectivamente.

Para a caracterização do canal as condições de WSS e US em conjunto são levados em conta. Isto significa que as estatísticas de primeira e segunda ordem são invariantes no tempo e na frequência e por essa razão muito mais fácil de tratar. Aplicando as condições de WSS e US as funções de correlação reduzem a funções bi-dimensionais e a relação entre elas tornam-se novamente uma única transformada de Fourier. As novas relações entre as funções de Bello são mostradas na Figura 13.

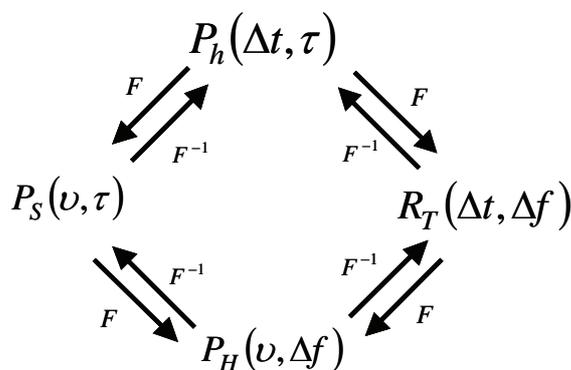


Figura 13 - Funções de Bello para um canal WSSUS

4.2.4

Funções de Bello para o Canal Seletivo no Espaço e Dispersão da Direção

Em [80] são apresentados resultados analíticos relacionando as características estatísticas de primeira e segunda ordem para a caracterização da dispersão da direção e da seletividade espacial para um canal de rádio.

Como já apresentado, o modelo de Bello é utilizado para descrever sistemas lineares variantes no tempo e é representado por quatro funções equivalentes. Estas funções procuram descrever a dispersão no domínio dos retardos e no domínio Doppler e a seletividade no tempo e na frequência de um canal de rádio.

A principal característica da modelagem de Bello é que a seletividade e a dispersão são expressões duais em diferentes domínios do mesmo fenômeno. Em [80], as funções de Bello são estendidas para incluir dispersão na direção e seletividade espacial no canal de rádio. Assim, além da dualidade dispersão no domínio dos retardos-seletividade em frequência, dispersão no domínio Doppler-seletividade temporal, existirá também dispersão na direção-seletividade espacial.

4.2.4.1

Dispersão na Direção

- **Função de espalhamento *direction-delay-Doppler***

Como anteriormente explicado, qualquer canal linear variante no tempo pode ser representado pela função de espalhamento dos retardos ou pela função de espalhamento Doppler. Por esta razão, estas duas funções proporcionam uma descrição explícita de somente um aspecto do canal, a dispersão do atraso ou o deslocamento Doppler. A função delay-Doppler foi desenvolvida para proporcionar uma descrição simultânea da dispersão do atraso e do deslocamento Doppler. Utilizando as relações estabelecidas pela Figura 12 e pela Equação (4), a relação entre o sinal de entrada $s(t)$ e o sinal de saída $y(t)$ pode ser escrita como:

$$y(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} s(t-\tau) S(\tau, \nu) e^{j2\pi\nu t} d\nu dt \quad (17)$$

Considere agora um sistema um sistema de coordenada onde 0 é a origem e o receptor está localizado na posição x . Reescrevendo (17) de acordo com [80], tem se:

$$y(x, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} s(t-\tau) h(\Omega, \tau, \nu) e^{j2\pi\nu t} e^{j\frac{2\pi}{\lambda}(\Omega \cdot x)} d\Omega d\nu dt \quad (18)$$

onde λ é o comprimento de onda, τ é o atraso, ν é a frequência Doppler e Ω é a direção de incidência da onda. A direção é descrita por um vetor unitário Ω com ponto inicial na origem [80]. O ponto definido pelo vetor unitário está localizado em uma esfera de raio unitário centrado na origem 0. O vetor unitário Ω é determinado pelas coordenadas esféricas $(\phi, \theta) \in [-\pi, \pi] \times [0, \pi]$ e, assim, Ω é dado por:

$$\Omega = c(\phi, \theta) = [\cos(\phi) \text{sen}(\theta), \text{sen}(\phi) \text{sen}(\theta), \cos(\theta)]^T$$

Cada par de (ϕ, θ) corresponde a único vetor unitário ou ponto na esfera. Os ângulos ϕ e θ são referenciados como ângulos de azimute de elevação respectivamente. Contudo, neste trabalho limitaremos a apresentar os resultados apenas para a situação de um uma onda propagando somente na horizontal. Assim, $\Omega = c(\phi) = [\cos(\phi), \text{sen}(\phi)]^T$ indicando que Ω é um vetor unitário de duas dimensões localizado em um circulo de raio unitário.

A função $h(\Omega, \nu, \tau)$ é chamada de função de espalhamento *direction-delay-Doppler*. Está função caracteriza o comportamento dispersivo do canal na direção, no domínio dos retardos e no domínio Doppler. É assumido que a função $h(\Omega, \nu, \tau)$ é um processo estocástico de média zero, ou seja, $E[h(\Omega, \nu, \tau)] = 0$.

• Potência Espectral *Direction-delay-Doppler*

A função $h(\Omega, \nu, \tau)$ é US, se:

$$E[h^*(\Omega, \nu, \tau) h(\Omega', \nu', \tau')] = P(\Omega, \nu, \tau) \delta(\Omega - \Omega') \delta(\tau - \tau') \delta(\nu - \nu') \quad (19)$$

é satisfeita [80, 81], onde $P(\Omega, \nu, \tau)$ é a potência espectral *direction-delay-Doppler*. Esta potência é dada por:

$$P(\Omega, \nu, \tau) = E \left[|h(\Omega, \nu, \tau)|^2 \right] \quad (20)$$

e descreve a maneira como a potência média é distribuída ou espalhada no domínio *direction-delay-Doppler*.

A função de espalhamento direcional é dada por:

$$h(\Omega) = \int \int h(\Omega, \nu, \tau) d\tau d\nu \quad (21)$$

e caracteriza o comportamento dispersivo somente na direção da função de espalhamento *direction-delay-Doppler*. Novamente, se a $h(\Omega, \nu, \tau)$ for US, então $h(\Omega)$ também é e:

$$E \left[h^*(\Omega) h(\Omega') \right] = P(\Omega) \delta(\Omega - \Omega') \quad (22)$$

é satisfeita[80]. $P(\Omega)$ é a potência espectral direcional dada por:

$$P(\Omega) = E \left[|h(\Omega)|^2 \right] \quad (23)$$

e descreve a maneira como a potência média é espalhada no domínio direcional. $P(\Omega)$ é obtida a partir de $P(\Omega, \nu, \tau)$. Assim, tem se:

$$P(\Omega) = \int \int P(\Omega, \nu, \tau) d\tau d\nu \quad (24)$$

Seguindo este mesmo raciocínio para os parâmetros de retardo e da frequência Doppler, tem se:

$$h(\tau) = \int \int h(\Omega, \nu, \tau) d\Omega d\nu \quad (25)$$

$$h(\nu) = \int \int h(\Omega, \nu, \tau) d\Omega d\tau \quad (26)$$

onde $h(\tau)$ e $h(\nu)$ caracterizam o comportamento dispersivo dos retardos e do deslocamento Doppler da função de espalhamento *direction-delay-Doppler*, respectivamente. Considerando $h(\Omega, \nu, \tau)$ US, tem se:

$$P(\tau) = E \left[|h(\tau)|^2 \right] \iint P(\Omega, \nu, \tau) d\Omega d\nu \quad (27)$$

$$P(\nu) = E \left[|h(\nu)|^2 \right] \iint P(\Omega, \nu, \tau) d\Omega d\tau \quad (28)$$

$P(\tau)$ e $P(\nu)$ são as potências espectrais no domínios dos retardos e Doppler.

- **Espalhamento Direcional e Direção Média**

A definição de espalhamento direcional é análoga a obtidas para os espalhamentos de retardos e Doppler. Assim, tem se:

$$\sigma_\tau = \sqrt{\int (\tau - \mu_\tau)^2 P(\tau) d\tau} \quad (29)$$

$$\sigma_\nu = \sqrt{\int (\nu - \mu_\nu)^2 P(\nu) d\nu} \quad (30)$$

$$\sigma_\Omega = \sqrt{\int (\Omega - \mu_\Omega)^2 P(\Omega) d\Omega} \quad (31)$$

os espalhamentos de retardos, Doppler e direcional, respectivamente, onde:

$$\mu_\tau = \int \tau P(\tau) d\tau \quad (32)$$

$$\mu_\nu = \int \nu P(\nu) d\nu \quad (33)$$

$$\mu_\Omega = \int \Omega P(\Omega) d\Omega \quad (34)$$

são as médias dos atrasos, das freqüências Doppler e das direções. Contudo, é importante ressaltar que μ_Ω e σ_Ω não possuem significados de ângulos e possuem as seguintes propriedades, como definido em [80]:

$$|\mu_\Omega| \leq 1 \text{ e } \sigma_\Omega^2 = 1 - |\mu_\Omega|^2$$

Assim, σ_Ω é determinado unicamente por $|\mu_\Omega|$ e vice-versa. Pode se observar também que $0 \leq \sigma_\Omega \leq 1$.

Reescrevendo (31) e (34) em função do ângulo azimutal, temos:

$$\sigma_\Omega = \sqrt{\int (e^{j\phi} - \mu_\Omega)^2 P(\phi) d\phi} \quad (35)$$

$$\mu_\Omega = \int e^{j\phi} P(\phi) d\phi \quad (36)$$

sendo $P(\phi)$ a potência espectral azimutal. O espalhamento angular dado por (35) é uma medida que mostra como os multipercursos concentram em torno de uma única direção azimutal [80, 82]. Porém, alguns autores definem o espalhamento angular como o desvio padrão em relação ao valor médio dado por [83].

$$\phi_{RMS} = \sqrt{\frac{\int (\phi - \phi_m)^2 P(\phi) d\phi}{\int P(\phi) d\phi}} \quad (36)$$

sendo ϕ_m é a média dos ângulos dada por:

$$\phi_m = \frac{\int \phi P(\phi) d\phi}{\int P(\phi) d\phi} \quad (37)$$

4.2.4.2

Seletividade Espacial

- **Função de Transferência Espaço-freqüência-tempo**

A Equação (18) pode ser reescrita como:

$$y(x, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} S(f) e^{j2\pi ut} e^{j2\pi ft} h(x, f, t) df \quad (38)$$

Neste expressão, $S(f)$ é a transformada de Fourier de $s(t)$ e:

$$H(x, f, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{j2\pi \left[-f\tau + \nu t + \frac{(\Omega \cdot x)}{\lambda} \right]} h(\Omega, \tau, \nu) d\Omega d\nu d\tau \quad (39)$$

é a função de transferência espaço-frequência-tempo da função de espalhamento *direction-delay-Doppler*. Quando $H(x, f, t)$ é variante na frequência, o canal é seletivo em frequência. Similarmente, se a função transferência espaço-frequência-tempo é variante no tempo e no espaço, o canal é seletivo no tempo e no espaço, respectivamente.

- **Função de Correlação Espaço-frequência-tempo**

Se $h(\Omega, \nu, \tau)$ é US então $H(x, f, t)$ é WSS. Neste caso a função autocorrelação da função transferência espaço-frequência-tempo é dada por:

$$E \left[H(x, f, t)^* H(x + \Delta x, f + \Delta f, t + \Delta t) \right] = R(\Delta x, \Delta f, \Delta t) \quad (40)$$

A função $R(\Delta x, \Delta f, \Delta t)$ é chamada de função correlação espaço-frequência-tempo do canal de radio. Esta função caracteriza a seletividade conjunta no espaço, frequência e tempo do canal. A função $R(\Delta x, \Delta f, \Delta t)$ é a transformada de Fourier da potência espectral *direction-delay-Doppler*. Assim, temos:

$$R(\Delta x, \Delta f, \Delta t) = \iiint e^{j2\pi \left[-\Delta f \tau + \frac{\Omega \cdot \Delta x}{\lambda} + \nu \Delta t \right]} P(\Omega, \nu, \tau) d\Omega d\nu d\tau \quad (41)$$

A função correlação espacial do canal é dada por:

$$R(\Delta x) = E \left[H(x, f, t)^* H(x + \Delta x, f, t) \right] = R(\Delta x, \Delta f, \Delta t) \Big|_{\Delta f = \Delta t = 0}$$

A função $R(\Delta x)$ também é obtida através da transformada de Fourier da potência espectral direcional, dada por:

$$R(\Delta x) = \int e^{j2\pi \left[\frac{\Omega \cdot \Delta x}{\lambda} \right]} P(\Omega) d\Omega \quad (42)$$

Similarmente esta mesma análise pode ser feita para obtenção das funções de correlação da frequência e do tempo, utilizando a relação entre a transformada de Fourier e suas potências espectrais.

Reescrevendo a Equação 42 em função do ângulo azimutal, tem se:

$$R(\Delta x) = \int e^{j2\pi \left[\frac{c(\phi) \cdot \Delta x}{\lambda} \right]} P(\phi) d\phi \quad (43)$$

- **Distância de Coerência**

A definição de distância de coerência é análoga à obtida para o tempo e a banda de coerência. Assim, tem se o tempo de coerência dado por:

$$(\Delta t)_c = \min \{ \Delta t > 0 : |R(\Delta t) = c| \} \quad (44)$$

e a banda de coerência dada por:

$$(\Delta f)_c = \min \{ \Delta f > 0 : |R(\Delta f) = c| \} \quad (45)$$

e a distância de coerência dada por:

$$(\Delta d)_c = \min \{ \Delta x : |R(\Delta x) = c| \} \quad (46)$$

em um certo nível $c \in [0,1)$.

- **Relação entre Espalhamento Angular e Distância de Coerência**

Em [83] é definido que tempo de coerência é inversamente proporcional ao espalhamento Doppler e pode ser aproximado por:

$$(\Delta t)_c = \frac{1}{\sigma_v} \quad (47)$$

e que a banda de coerência do canal é inversamente proporcional ao espalhamento de retardo, sendo dada por:

$$(\Delta f)_c = \frac{1}{\sigma_\tau} \quad (48)$$

e que a distância de coerência é inversamente proporcional ao espalhamento angular, sendo dada por:

$$(\Delta x)_c = \frac{1}{\phi_{RMS}} \quad (49)$$

A Equação (49) mostra que quanto maior é o espalhamento angular, menor é a distância de coerência.